



TESIS DOCTORAL

**Estudio de la estabilidad de la frecuencia para  
una red eléctrica débil ante la integración de  
energía undimotriz en su sistema**

Isabel Villalba Cabrera

Programa de Doctorado:  
Tecnologías de la Telecomunicación e Ingeniería Computacional

Marzo de 2021  
Las Palmas de Gran Canaria







TESIS DOCTORAL

**Estudio de la estabilidad de la frecuencia para  
una red eléctrica débil ante la integración de  
energía undimotriz en su sistema**

Programa de Doctorado  
Tecnologías de la Telecomunicación e Ingeniería Computacional.

Unidad Responsable  
Instituto de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI)

Autor

Fdo: Isabel Villalba Cabrera

**Director**

**Director**

Fdo: Dr. D. Marcos Lafoz Pastor

Fdo: D. Dr Fabián Déniz Quintana

Las Palmas de Gran Canaria marzo de 2021



*Si supiese qué es lo que estoy haciendo, no lo llamaría  
investigación, ¿verdad?*

*Albert Einstein*



*A Quinti, el faro que alumbra mi camino en la vida.*

*A mis hijos, Jose e Isabel.*



# Agradecimientos.

Quiero empezar mis agradecimientos dedicando unas palabras a la memoria del que fuera director de esta tesis el profesor Dr. Felipe Díaz Reyes que falleció de manera inesperada durante la realización de la misma. Allá donde esté le doy las gracias por confiar en mí para la realización de este trabajo.

Agradecer a mis directores de tesis el Dr. Marcos Lafoz Pastor y el Dr. Fabián Déniz Quintana por su dedicación y constante apoyo durante todo el proceso, tanto a nivel profesional como personal.

Al profesor Dr. D. Miguel Martínez Melgarejo, gracias por ayudarme a dar el último impulso que necesitaba para finalizar este trabajo.

Agradecer a los miembros de la Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia del Centro de Investigaciones Medioambientales y Energéticas (CIEMAT) y en especial a Marcos Blanco, Gustavo Navarro y Jorge Torres, la acogida dentro de su equipo de investigación durante mi estancia predoctoral, facilitar mi trabajo y enseñarme el valor de la investigación.

Al profesor de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) Dr. D. Juan Ignacio Pérez, por su aportación en el apartado del modelo de red eléctrica de la isla de Tenerife.

A César Martín responsable del Departamento de Innovación de la Autoridad Portuaria de Las Palmas, sin su colaboración para la obtención de los datos de medida del oleaje no hubiera sido posible la realización de una parte del presente estudio.

Dedicar también unas palabras a todos los que de alguna manera me han apoyado de manera personal durante este tiempo. A Diana y Marian, sin ellas mi estancia en Madrid no hubiese sido la misma. A Luz María y Aketza, gracias por ser parte de mi familia, por su consejo y apoyo en todo momento. A mis amigas Sensa, Lorena y Conchi que siempre creen en mí y me animan constantemente a crecer como persona en la vida. A los chicos de “La Comarca”, gracias por escucharme en los momentos de crisis y darme ánimos para poder continuar.

Aunque la dedicatoria principal de este trabajo es para ellos, quiero dedicarles unas palabras a las personas más importantes de mi vida, mi marido Quinti y mis hijos Jose e Isabel, gracias por su apoyo incondicional durante todo el proceso, sin ellos no lo habría conseguido.

Para finalizar quiero hacer un guiño especial de agradecimiento a mi perra Nala que me ha acompañado fielmente durante todas las horas dedicadas a este trabajo esperando pacientemente bajo mis pies.

Agradecer a la Fundación Universitaria de Las Palmas (FULP) por la concesión de la Ayuda a la Investigación otorgada a la presente tesis doctoral en el curso 2018/2019 dentro de la convocatoria de ayudas al fomento de la investigación.

La presente tesis doctoral ha sido realizada bajo el marco de una Estancia predoctoral en el Centro de Investigaciones Medio Ambientales y Energéticas (CIEMAT) dentro de las líneas de investigación de la Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia dedicada a la investigación y desarrollo de tecnologías de energía undimotriz y sistemas de almacenamiento energético.



## Resumen.

En la presente tesis doctoral se ha realizado un estudio de la estabilidad de la frecuencia en una red eléctrica débil ante la integración de energía undimotriz en su sistema.

El objetivo de la realización del estudio ha sido la evaluación del comportamiento del perfil de la frecuencia de una red eléctrica ante la integración de un parque de generación undimotriz en su sistema y establecer si existen escenarios en los que se produzcan eventos de frecuencia fuera de los límites establecidos por el operador del sistema eléctrico. Se ha seleccionado para el estudio una red eléctrica débil perteneciente a un sistema insular, dado que en este tipo de sistemas eléctricos la energía undimotriz presenta una mayor aplicabilidad y son este tipo de sistemas los que presentan mayores problemas de estabilidad de la frecuencia ante la integración de energías renovables.

En primer lugar, se han desarrollado los modelos de: recurso del oleaje, tecnología de captación, parque de generación y red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia, que darán como resultado un modelo conjunto. A partir de los modelos que han dado lugar al parque de generación undimotriz se han generado diferentes escenarios de generación obteniendo diferentes perfiles de potencia undimotriz. Dichos perfiles de potencia se han integrado en el modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia donde se han planteado diferentes escenarios de comportamiento de la red eléctrica. Como resultado de la integración de las diferentes potencias de generación undimotriz y escenarios de comportamiento de la red eléctrica se han obtenido los perfiles de comportamiento de la frecuencia de red para cada escenario.

A partir de estos perfiles de comportamiento de la frecuencia de red se han cuantificado los eventos o desviaciones de frecuencia fuera de los límites establecidos por el operador de sistema para este tipo de sistemas eléctricos. Con los resultados obtenidos del total de escenarios planteados se ha realizado un análisis estadístico con el objetivo de establecer la relación entre la potencia generada por el parque de generación undimotriz y las desviaciones de frecuencia.

Finalmente, para dar solución a los escenarios de generación no viables desde el punto de vista de la estabilidad de la frecuencia, se ha integrado en el modelo conjunto un mecanismo de alisado para la potencia generada por el parque undimotriz. Como mecanismo de alisado de potencia se ha seleccionado un sistema de almacenamiento energético.

Como resultado principal del estudio se ha obtenido una metodología que servirá de soporte a los tecnólogos a la hora de evaluar la viabilidad de los parques de generación undimotriz que se propongan integrar en los parques de generación renovable de sistemas eléctricos débiles o insulares desde el punto de vista de estabilidad de la frecuencia de red.



## Abstract.

In this doctoral thesis, a study of the stability of the frequency in a weak electrical network has been carried out before the integration of wave energy.

The aim of the study was to evaluate the behaviour of the frequency profile network with the integration of a park of wave generation and establish whether there are scenarios in which events occur frequency outside the limits set by the system operator. A weak electrical network belonging to an island system has been selected for the study. In this type of electrical systems, wave energy has greater applicability in addition to presenting greater frequency stability problems before the integration of renewable energies.

In the first place, the models of: wave resource, conversion technology, generation park and weak electrical network in the frequency regime have been developed, which will result in a joint model. From the models that have given rise to the wave power generation park, different generation scenarios have been generated, obtaining different wave power profiles. These power profiles have been integrated into the weak electrical network model in the frequency regime where different scenarios of network behaviour have been proposed. As a result of the integration of the different wave power generation powers, the behaviour profiles of the network frequency have been obtained for each scenario.

From these network frequency behaviour profiles, events or frequency deviations outside the limits established by the system operator for this type of electrical systems have been quantified. With the results obtained from the total of scenarios proposed, a statistic analysis has been carried out to establish the relationship between the power generated by the wave power generation park and the frequency deviations.

Finally, to solve the non-viable generation scenarios from the point of view of frequency stability, a smoothing mechanism for the power generated by the wave park has been integrated into the joint model. An energy storage system has been used as a power smoothing mechanism.

As a result of the study, a methodology has been obtained that will support technologists when evaluating the viability of wave generation parks that they propose to integrate into renewable generation parks of weak or insular electrical systems from the point of view stability of the network frequency.



# Índice de Contenidos.

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO APLICADO A LA TESIS.....</b>	<b>5</b>
2.1	LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ A ESCALA GLOBAL.....	5
2.1.1	<i>Las olas como recurso energético.....</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Tecnologías de captación de la energía de las olas.....</i>	<i>9</i>
2.1.3	<i>Integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica.....</i>	<i>15</i>
2.1.4	<i>Situación actual de la energía undimotriz.....</i>	<i>17</i>
2.2	ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA EN REDES ELÉCTRICAS.....	23
2.2.1	<i>Concepto de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia (SEP).....</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Estabilidad de la frecuencia en SEP.....</i>	<i>25</i>
2.2.3	<i>Estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas débiles.....</i>	<i>30</i>
2.3	MECANISMOS PARA CONTRIBUIR A LA ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA.....	38
2.3.1	<i>Introducción.....</i>	<i>38</i>
2.3.2	<i>Sistemas de almacenamiento energético como mecanismos para el alisado de la potencia.....</i>	<i>40</i>
<b>3</b>	<b>REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>49</b>
3.1.1	<i>Estudios de integración de la energía undimotriz en redes eléctricas.....</i>	<i>49</i>
3.1.2	<i>Estudios de estabilidad de redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz.....</i>	<i>53</i>
3.1.3	<i>Estudios de alisado de la potencia (power smoothing) para contribuir a la estabilidad de la red ante la integración de energía undimotriz.....</i>	<i>56</i>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS, CONTRIBUCIONES Y METODOLOGÍA DE LA TESIS.....</b>	<b>59</b>
4.1	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	59
4.2	CONTRIBUCIONES DE LA TESIS.....	60
4.3	METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS.....	61
<b>5</b>	<b>DESARROLLO DE MODELOS PARA EL ANÁLISIS.....</b>	<b>67</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	67
5.2	MODELO DEL RECURSO DEL OLEAJE.....	68
5.2.1	<i>Evaluación de recurso del oleaje en una localización.....</i>	<i>68</i>
5.2.2	<i>Aplicación de la evaluación del recurso del oleaje a la isla de Tenerife.....</i>	<i>70</i>
5.3	MODELO DE TECNOLOGÍA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DEL OLEAJE.....	75
5.3.1	<i>Introducción.....</i>	<i>75</i>
5.3.2	<i>Tecnología de captación seleccionada: el absorbedor puntual de dos cuerpos.....</i>	<i>77</i>
5.3.3	<i>Herramienta computacional NEMOH.....</i>	<i>82</i>
5.3.4	<i>Herramienta computacional BEMIO.....</i>	<i>87</i>
5.3.5	<i>Herramienta computacional WEC-SIM.....</i>	<i>91</i>
5.4	MODELO DE PARQUE DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ.....	96
5.4.1	<i>Definición de parámetros parque de generación undimotriz.....</i>	<i>96</i>
5.4.2	<i>Modelo de parque de generación undimotriz en la isla de Tenerife.....</i>	<i>97</i>

5.5	MODELO DE RED ELÉCTRICA DÉBIL EN EL RÉGIMEN DE LA FRECUENCIA.....	98
5.5.1	<i>Fundamentos del control frecuencia-potencia.....</i>	98
5.5.2	<i>Regulación primaria.....</i>	99
5.5.3	<i>Regulación secundaria.....</i>	103
5.5.4	<i>Modelo de la red eléctrica de Tenerife en el régimen de la frecuencia.....</i>	103
<b>6</b>	<b>ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA.....</b>	<b>107</b>
6.1	INTRODUCCIÓN.....	107
6.2	GENERACIÓN DE ESCENARIOS PARQUE DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ.....	108
6.2.1	<i>Generación de escenarios parque generación undimotriz isla de Tenerife.....</i>	109
6.3	SIMULACIONES EN EL MODELO DE RED ELÉCTRICA DÉBIL.....	118
6.3.1	<i>Simulaciones en Modelo de Red Eléctrica Débil de la isla de Tenerife.....</i>	119
6.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS.....	131
6.4.1	<i>Resultados análisis multivariante. Caso general.....</i>	131
6.4.2	<i>Resultados análisis regresión lineal. Caso particular.....</i>	135
<b>7</b>	<b>MECANISMO DE ALISADO DE POTENCIA: SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO PARA CONTRIBUIR A LA ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA EN REDES ELÉCTRICAS DÉBILES ANTE LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....</b>	<b>139</b>
7.1	INTRODUCCIÓN.....	139
7.2	INTEGRACIÓN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO.....	139
7.2.1	<i>Filtrado potencia instantánea parque de generación undimotriz (<math>P_{GEN}</math>).....</i>	141
7.2.2	<i>Cálculo Potencia Almacenamiento (<math>P_{ESS}</math>).....</i>	145
7.2.3	<i>Integración potencia alisada en red (<math>P_{GEN\_SMOOTHING}</math>).....</i>	150
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>153</b>
8.1	CONCLUSIONES.....	153
8.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	154
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>155</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>169</b>

# Índice de Figuras.

Figura 1. Representación de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida [5].....	6
Figura 2. Parámetros que caracterizan el oleaje según la teoría de ondas lineal [5].....	7
Figura 3. Clasificación general tecnologías de captación de la energía del oleaje. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 4. Clasificación de los sistemas de captación según la orientación.....	11
Figura 5. Clasificación de tecnologías de conversión en función de su principio de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia a partir de [4] [7].....	11
Figura 6. Esquema de convertidores de energía de olas con sistema de arrastre directo. Soluciones tecnológicas [10].....	13
Figura 7. Estructura OWC en el Puerto de Mutriku (España) y Dispositivo OCEANTEC.....	14
<i>Figura 8. Dispositivos de empuje horizontal: Waveroller, Oyster, Langlee.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9. Absorbedor puntual de Ocean Power Technologies.....</i>	<i>15</i>
Figura 10. Esquema elementos integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica.....	16
Figura 11. Porcentaje por tipo de dispositivos de energía de undimotriz más utilizado y rangos de TRL [20].....	19
Figura 12. Generación de electricidad por energía undimotriz en Europa [20].....	19
Figura 13. Clasificación Estabilidad SEP. Elaboración propia a partir de [25].....	24
Figura 14. Perfil de frecuencia de una red después de ocurrida una perturbación.....	28
Figura 15. Propuestas del ENTSO-E para la determinación del ROCOF por parte de los TSOs [33].....	29
Figura 16. Esquema de control y acciones en relación con la regulación de la frecuencia ENTSO-E. Fuente: elaboración propia a partir de [33].....	30
Figura 17. Requisitos de frecuencia en los principales sistemas eléctricos aislados [37]. ....	34
Figura 18. Requisitos de frecuencia para sistemas interconectados [37]. ....	34
Figura 19. El área de operación de tensión y frecuencia para el código de red insular francesa resultado de los trabajos a través de las conclusiones sacadas del grupo del ENTOS-E VRG IS [39].....	35
Figura 20. Rangos de operación REE para los SEIE España [38] [27].....	36
Figura 21. Regulación de la frecuencia para los casos A) islas británicas y B) islas francesas [39].....	38
Figura 22. Clasificación de los ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].....	41
Figura 23. GW instalados en 2017 según tipo de ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].....	42
Figura 24. Capacidad de energía de almacenamiento de energía térmica, electroquímica y electromecánica por tecnología EN 2017. Fuente: elaboración propia a partir de [40].....	42

Figura 25. Aplicaciones de los ESS para contribuir a la estabilidad de los SEP. Fuente: elaboración propia a partir de [40].....	46
Figura 26. Aplicación de los ESS como mecanismos de alisado de potencia (power smoothing): A) eliminación picos potencia, B) amortiguación fluctuaciones potencia.....	47
Figura 27. Clasificación tecnologías de almacenamiento por rango de capacidad y tiempo de carga/descarga. ....	47
Figura 28. Diagrama Flujo Metodología General de la tesis. Fuente: elaboración propia.	
Figura 29. Diagrama Integración Parque de Generación Undimotriz Red Eléctrica Débil. Fuente: elaboración propia.....	67
Figura 30. Ejemplo diagrama de dispersión en función datos boya de medida. Fuente: elaboración propia.....	69
Figura 31. Ejemplo matriz de contingencia a partir del diagrama de dispersión. Fuente: elaboración propia.....	69
Figura 32. Ejemplo matriz de potencia del oleaje (kW/m). Fuente: elaboración propia. ..	70
Figura 33. Zonas estudio recurso del oleaje isla de Tenerife [59].....	71
Figura 34. Matriz datos de oleaje Boya Gran Canaria. Eventos ocurridos. Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados por Puertos del Estado.....	74
Figura 35. Matriz datos de oleaje Boya Gran Canaria. Eventos ocurridos en %. Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados por Puertos del Estad .....	74
Figura 36. Convertidor Energía del Oleaje W1 en la costa de la isla de Gran Canaria. Fuente: WEDGE GLOBAL [18]. ....	75
Figura 37. Esquema metodología cálculo $P_{WEC}$ . Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 38. A) Partes de un absorbedor puntual. B) Desplazamiento de un absorbedor puntual respecto de la ola. ....	77
Figura 39. Fuerzas que actúan en un absorbedor puntual de dos cuerpos con cuerpo de reacción con inercia infinita (OPCIÓN 1) e inercia finita (OPCIÓN 2).....	77
Figura 40. Elementos que definen el comportamiento de un absorbedor puntual de dos cuerpos.....	78
Figura 41. Grados de libertad correspondientes a un WEC (absorbedor puntual) [114]....	78
Figura 42. A) Circuito eléctrico equivalente para un absorbedor puntual de dos cuerpos. B) Circuito eléctrico simplificado. C) Circuito equivalente simplificado representando la fuerza y la velocidad relativa entre los cuerpos. [119].....	81
Figura 43. Diagrama secuencia funcionamiento NEMOH. Fuente: elaboración propia. ...	82
Figura 44. División angular y mallado de un cuerpo mediante NEMOH. Fuente: Elaboración propia. ....	84
Figura 45. Resultado proceso mallado absorbedor puntual de dos cuerpos a partir de NEMOH.....	86
Figura 46. Coeficientes hidrodinámicos para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.....	86
Figura 47. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente de masa añadida del absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.....	88



Figura 48. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente radiación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.....	88
Figura 49. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente de respuesta impulso radiación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.....	89
Figura 50. Resultado de la ejecución de BEMIO coeficiente fuerza de excitación (módulo) para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia. ....	89
Figura 51. Resultado de la ejecución de BEMIO coeficiente fuerza de excitación (fase) para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia. ....	90
Figura 52. Resultado de la ejecución de BEMIO función respuesta impulso para el coeficiente de excitación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.....	90
Figura 53. Diagrama secuencia funcionamiento WEC-Sim. ....	91
Figura 54. Diagrama de flujo de funcionamiento del WEC-Sim. Fuente: elaboración propia a partir de [114]. ....	93
Figura 55. Modelo Simulink Absorbedor puntual de dos cuerpos para su ejecución en WEC-Sim. ....	94
<i>Figura 56. Resultados de WEC-Sim: fuerza del PTO y potencia extraída por el absorbedor puntual de dos cuerpos.....</i>	<i>95</i>
Figura 57. Perfil de Potencia generada por el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia a partir del modelo.....	95
Figura 58. Parámetros de diseño de un parque de generación undimotriz. ....	96
Figura 59. Perfil de potencia parque undimotriz 50 WECs para un diseño de parque de generación establecido.....	97
Figura 60. Función de transferencia entre potencia y frecuencia. ....	100
Figura 61. Diagrama de bloques del efecto de la frecuencia sobre la demanda.....	100
Figura 62. Diagrama de bloques del efecto de la frecuencia sobre la demanda con la acción de un regulador. ....	101
Figura 63. Diagrama de bloques de un regulador primario con estatismo.....	101
Figura 64. Diagrama de bloques con consigna de potencia. ....	102
Figura 65. Diagrama bloques regulación primaria. ....	102
Figura 66. Diagrama bloques regulación secundaria. ....	103
Figura 67. Diagrama de bloques del modelo red eléctrica de Tenerife de bus único. Fuente: elaboración propia.....	104
Figura 68. Diagrama flujo para el estudio estabilidad frecuencia red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación undimotriz en su sistema. Fuente: elaboración propia. ....	107
Figura 69. Escenarios de simulación estudio estabilidad de la frecuencia de red.....	109
Figura 70. Perfiles de potencia generada variando la potencia instalada de energía undimotriz (1 parque- 5 parques). Ventana ampliada. ....	111
Figura 71. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz para diferentes recursos del oleaje.....	112

Figura 72. Potencia instantánea parque undimotriz variando la altura significativa de la ola $H_s(m)$ .....	113
Figura 73. Potencia instantánea parque undimotriz variando el período de la ola $T_p(s)$	113
Figura 74. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz variando en $n^\circ$ de filas.	114
Figura 75. Potencia instantánea parque undimotriz variando en $n^\circ$ de filas. ....	115
Figura 76. Potencia instantánea parque undimotriz variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ).....	116
Figura 77. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ). ....	116
Figura 78. Energía total generada (MWh) para diferentes escenarios de parque de generación undimotriz. ....	117
Figura 79. Perfil de desviaciones en comportamiento de la frecuencia con sus parámetros característicos para un escenario parque de generación undimotriz en el sistema eléctrico débil isla de Tenerife. ....	118
Figura 80. Perfil de comportamiento de la frecuencia de red para la isla de Tenerife $P_{CON} = 350MW$ A) Sin generación renovable undimotriz B) Con 10 MW de generación renovable undimotriz. ....	120
Figura 81. Perfil de comportamiento de la frecuencia de red para la isla de Tenerife $P_{CON} = 350MW$ . Sin generación renovable undimotriz y con 10 MW de generación renovable undimotriz. Ventana ampliada. ....	121
Figura 82. Representación de la potencia generada y perfil de comportamiento de la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife para el caso ejemplo. ....	121
Figura 83. Resultados desviaciones de frecuencia por potencia instalada de parque de generación undimotriz. ....	123
Figura 84. Resultados desviaciones de frecuencia por tipo de evento para diferentes potencias instaladas de parque de generación undimotriz. ....	123
Figura 85. Multigráfica perfiles de comportamiento de la frecuencia para un mismo parque de generación sometido a diferentes condiciones de recurso del oleaje. ....	124
Figura 86. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando el $n^\circ$ de filas.....	125
Figura 87. Representación potencia instantánea generada por un parque undimotriz de 10 filas y perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife. Ventana temporal reducida. ....	126
Figura 88. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando $\alpha$ .....	127
Figura 89. Perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando $\alpha$ . Ventana temporal reducida. ....	128
Figura 90. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando $P_{CONV}$ . ....	129
Figura 91. Perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes estados de operación del sistema. Ventana temporal reducida.....	129

Figura 92. Perfil de comportamiento del ROCOF para un escenario de parque de generación undimotriz en la red eléctrica de Tenerife. ....	130
Figura 93. Técnicas de Análisis Multivariante desarrolladas. Fuente: elaboración propia a partir de [126]. ....	131
Figura 94. Resultados análisis multivariante: relación entre variables caso general. ....	133
Figura 95. Matriz de correlaciones Pearson Producto. Momento para el total de eventos frecuencia fuera estado normal de operación. ....	134
Figura 96. Recta de ajuste y diagrama de dispersión del caso particular. ....	137
Figura 97. Metodología integración ESS como mecanismo de alisado de potencia (power smoothing). Fuente: elaboración propia.....	140
Figura 98. Gráfica ejemplo determinación valores de ancho de banda para el filtrado de PGEN. Fuente: elaboración propia.....	142
Figura 99. Gráfica determinación valores para el filtrado de la señal potencia parque de generación undimotriz. ....	143
Figura 100. Valores potencia parque de generación para diferentes valores de filtrado...	144
Figura 101. Perfil de comportamiento de la frecuencia de la red de la isla de Tenerife: A) sin filtrar B) con filtrado 0,03 y C) filtrado 0,23. ....	145
Figura 102. Perfil de $P_{ESS}$ . ....	146
Figura 103. Módulo formado por 256 supercondensadores Maxwell Technologies perteneciente al laboratorio de ensayos CIEMAT. Fuente: elaboración propia. ....	148
Figura 104. Características de costes del ESS frente a eventos.....	149
Figura 105. $P_{ESS}$ sin limitar (Caso 0) frente a $P_{ESS}$ LIMITADA seleccionada (Caso 2).....	150
Figura 106. $P_{GEN}$ smoothing y $P_{GEN}$ sin smoothing.....	151
Figura 107. $P_{GEN}$ SMOOTHING mediante integración ESS real y perfil de comportamiento de frecuencia de red de la isla de Tenerife.....	151



# Índice de Ecuaciones.

Ecuación 1. Energía contenida en una ola regular según teoría de ondas lineal [5].	8
Ecuación 2. Potencia por unidad de frente de ola en un oleaje regular según la teoría de ondas lineal [5].	8
Ecuación 3. Potencia por frente de ola en un oleaje irregular en función del espectro Pierson Moskowitz [6].	9
Ecuación 4. Movimiento del rotor de una máquina eléctrica [27].	26
Ecuación 5. Rate of Change of Frequency [27].	29
Ecuación 6. Desviación de la frecuencia en estado estacionario.	29
Ecuación 7. Ecuación general para un cuerpo flotante.	79
Ecuación 8. Ecuación que describe la mecánica de una ola.	79
Ecuación 9. Ecuación fuerza de excitación.	79
Ecuación 10. Ecuación fuerza de radiación.	79
Ecuación 11. Ecuación general para un cuerpo flotante en el dominio del tiempo.	80
Ecuación 12. Ecuación general para un cuerpo flotante en el dominio de la frecuencia.	80
Ecuación 13. Ecuación general que define el comportamiento de un absorbedor puntual de dos cuerpos.	80
Ecuación 14. Ecuaciones que definen la potencia eléctrica en función de los parámetros del PTO.	82
Ecuación 15. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina.	99
Ecuación 16. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina simplificada.	99
Ecuación 17. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina valores pu.	99
Ecuación 18. Constante de inercia.	99
Ecuación 19. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina en función de la potencia.	99
Ecuación 20. Ecuación de oscilación de una máquina síncrona.	100
Ecuación 21. Relación incremento de la demanda e incremento de la frecuencia.	100
Ecuación 22. Definición estatismo.	101
Ecuación 23. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia I.	105
Ecuación 24. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia II.	105
Ecuación 25. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia III.	105
Ecuación 26. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia IV.	105
Ecuación 27. Ecuación relación desviaciones frecuencia y potencia generada modelo ajuste.	136
Ecuación 28. Ecuación aplicación filtrado potencia para cálculo $P_{ESS}$ .	141
Ecuación 29. Cálculo de potencia de alisado ( <i>PGEN SMOOTHING</i> ) a partir de la potencia de almacenamiento limitada.	150



# Índice de Tablas.

Tabla 1. Niveles de madurez. Technology Readiness Levels (TRL). Fuente: Elaboración propia a partir de [22].	18
Tabla 2. Proyectos de demostración precomerciales y de primera clase de energía de olas [20].	22
Tabla 3 Clasificación de los sistemas eléctricos aislados. Fuente: Elaboración propia a partir de [35].	31
Tabla 4 Clasificación de los sistemas eléctricos insulares. Fuente: Elaboración propia a partir de [35].	31
Tabla 5. Valores ROCOF para sistemas eléctricos aislados [27].	36
Tabla 6. Conceptos principales para los ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].	40
Tabla 7. Datos altura significativa de ola (Hs). Fuente: elaboración propia.	72
Tabla 8. Datos Período Pico (Ts). Fuente: elaboración propia.	72
Tabla 9. Resultados estadísticos de prueba. Fuente: elaboración propia.	72
Tabla 10. Valores de recurso undimotriz seleccionados en base a la matriz de contingencia obtenida para el recurso undimotriz del Norte de la isla de Tenerife.	73
Tabla 11. Términos de la ecuación general para un cuerpo flotante [114].	79
Tabla 12. Parámetros para la generación de escenarios de parque de generación para la isla de Tenerife.	110
Tabla 13. Tabla escenarios operación red eléctrica de Tenerife en función de la participación generación convencional y renovable a la cobertura de la demanda.	119
Tabla 14. Resultados desviaciones de frecuencia por potencia instalada de parque de generación undimotriz.	122
Tabla 15. Resumen estadístico variables análisis multivariante.	132
Tabla 16. Resultado covarianzas.	132
Tabla 17. Resultados correlaciones análisis multivariante.	133
Tabla 18. Tabla resultado análisis caso particular.	135
Tabla 19. Casos límites de saturación.	147
Tabla 20. Dimensionamiento y costes del ESS para los diferentes casos de estudio.	149





---

## Capítulo 1

---

### 1 Introducción.

La Conferencia de las Partes (COP) órgano de decisión de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC) en su vigésima quinta reunión ha reunido a los líderes mundiales con el objetivo de tomar decisiones para cumplir los compromisos suscritos en el Acuerdo de París firmado en 2019 de reducción de emisiones contaminantes para frenar la crisis climática que vivimos.

El cambio climático avanza más rápidamente de lo que se esperaba. Si el ritmo de emisiones contaminantes a la atmósfera continúa como hasta ahora la temperatura media global subirá más de 3° a finales de este siglo provocando graves consecuencias para el planeta y los seres que en él habitamos.

Los países miembros europeos han acordado potenciar medidas climáticas y energéticas para conseguir a horizonte 2050 que Europa sea una zona climáticamente neutra cumpliendo con los objetivos planteados en el Acuerdo de París en 2019 de lograr limitar el calentamiento global a 1,5°.

En este contexto aparecen las energías renovables como herramienta para la lucha contra el cambio climático dentro del modelo de transición energética para Europa. Aumentar en un 32% la penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico europeo en la próxima década conseguiría disminuir las emisiones contaminantes en un 45% contribuyendo en gran medida en la lucha contra el cambio climático a nivel global.

Numerosos estudios y proyectos desarrollados han evidenciado el gran potencial en recursos renovables que presentan los territorios insulares del espacio europeo, siendo estos territorios una pieza clave para conseguir los objetivos planteados anteriormente. Por otro lado, la alta dependencia de los combustibles fósiles y las limitaciones territoriales y medioambientales que presentan estos territorios, han dado lugar a la diversificación de sus parques de generación renovable, apostando por la integración de otras energías renovables distintas a las convencionales como la eólica o la solar, dando paso a las energías oceánicas como la energía undimotriz objeto de la presente tesis doctoral.

Actualmente la mayoría de las soluciones tecnológicas desarrolladas en el ámbito de la energía undimotriz se encuentran en fases muy preliminares dentro de los llamados niveles de madurez (TRL) de las tecnologías oceánicas no llegando todavía a la etapa comercial imposibilitando su integración en los parques de generación renovable. Por esta razón las

líneas de investigación teórica y aplicada en relación con la energía undimotriz se están centrando en el estudio de mecanismos que aceleren su avance tecnológico para que la integración de parques de generación undimotriz sea una opción viable en un futuro cercano.

Dentro de estos niveles de madurez (TRL) encontramos el nivel TRL7: Ensayo en entorno real de operación. El objetivo de este nivel es el de certificar que la tecnología funciona correctamente en un entorno de operación real, es decir conectada a la red eléctrica evacuando la energía producida de manera correcta cumpliendo los requisitos establecidos por el operador del sistema (TSO), no comprometiendo la estabilidad de la red eléctrica donde se evacue dicha energía. Este aspecto se hace más crítico en los sistemas eléctricos insulares debido a las características propias de este tipo que redes eléctricas que hacen que la integración de energías renovables en sus sistemas provoque impactos en la estabilidad de la red.

Con el objetivo de contribuir al avance en el desarrollo tecnológico de la energía undimotriz con éxito y por lo tanto la integración de parques de energía undimotriz sea una realidad en los sistemas eléctricos en general y en especial de los territorios insulares se plantea la presente tesis doctoral, que se centra en el estudio de la estabilidad de la frecuencia de una red eléctrica débil ante la integración de energía undimotriz en su sistema.

En primer lugar, se ha dedicado un capítulo al marco teórico (Capítulo 2) donde se recopilan los conceptos de interés que son tratados dentro de la presente tesis doctoral. Dentro del Capítulo 2 se resumen los conceptos fundamentales en relación con la energía undimotriz partiendo de la ola como recurso energético, las tecnologías de captación, su integración en redes eléctricas y la situación actual de la energía undimotriz en el modelo energético actual así como los conceptos relacionados con la estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas débiles (normativa, procedimientos de operación) y los mecanismos para alisado de la potencia procedente del parque undimotriz (power smoothing) para contribuir a la estabilidad de la red, en concreto los sistemas de almacenamiento energético.

A continuación, se ha realizado una revisión del estado del arte (Capítulo 3) donde se resumen los estudios e investigaciones realizadas en el ámbito de la integración de energía undimotriz en redes eléctricas, la estabilidad de las redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz y la aplicación de mecanismos para el alisado de potencia (power smoothing) para contribuir a la estabilidad de las redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz.

En base a la revisión de estado del arte se plantean los objetivos a alcanzar, la metodología general que se ha desarrollado para la consecución de los objetivos planteados y se establecen las contribuciones principales para la presente tesis doctoral

(Capítulo 4). El objetivo principal de la presente tesis doctoral es la generación de una metodología que sirva de soporte a los tecnólogos a la hora de evaluar la viabilidad, desde el punto de vista de la estabilidad de la red, de los parques de generación undimotriz que proponen para su integración en redes eléctricas y en concreto en las redes eléctricas débiles, determinando si pueden provocar perturbaciones en la estabilidad de la frecuencia y si es así qué mecanismos aplicar para suavizar o alisar dicha señal y que cumpla con los requisitos establecidos por el operador del sistema dentro de sus códigos de red.

En el Capítulo 5 se resumen los modelos desarrollados para la realización del análisis de estabilidad. Se ha realizado un modelo conjunto formado por el modelo de parque de generación undimotriz y el modelo de red eléctrica débil particularizando en el caso real de una red eléctrica insular, donde se va a realizar el estudio de estabilidad de la frecuencia de red. Una vez definida la metodología para la generación de los modelos se ha realizado una aplicación del modelo conjunto en una red eléctrica débil de una localización viable para la integración de un parque de generación undimotriz. Este caso aplicación se ha realizado para la isla de Tenerife en las islas Canarias, territorio insular perteneciente al denominado Espacio Atlántico Europeo. Se han planteado distintos escenarios de parque de generación undimotriz junto con diferentes escenarios de operación de la red eléctrica evaluando la influencia de los parámetros que forman parte del modelo conjunto en la estabilidad de la frecuencia de red (Capítulo 6).

Para los casos en los que el parque de generación propuesto presente oscilaciones de frecuencia que puedan afectar al estado normal de operación del sistema eléctrico se propone una metodología solución al problema mediante la integración de un mecanismo de alisado de la potencia a entregar a la red eléctrica por parte del parque de generación undimotriz (Capítulo 7). Como mecanismo de alisado se ha propuesto la integración de un sistema de almacenamiento energético en el modelo conjunto, continuando con las líneas de investigación ya iniciadas en este ámbito para contribuir a la estabilidad de sistemas eléctricos ante la integración de energía undimotriz.

Finalmente se han establecido las conclusiones del presente estudio y las futuras líneas de investigación a desarrollar (Capítulo 8).



---

## Capítulo 2

---

### 2 Marco teórico aplicado a la tesis.

En el presente capítulo se realiza una breve descripción teórica de los tres bloques fundamentales que forman parte del estudio realizado en la presente tesis doctoral: la energía undimotriz a escala global, la estabilidad en redes eléctricas débiles y los sistemas de almacenamiento como mecanismos que contribuyen a la mejora de la estabilidad de las redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz.

El objetivo de este bloque es dar a conocer los conceptos más relevantes de estos campos de estudio, que han sido aplicados durante la realización de la presente tesis doctoral, para una mejor comprensión del estudio realizado.

#### 2.1 La energía undimotriz a escala global.

Desde la época de Primera Guerra Mundial (1914-1918) el petróleo se convirtió en la principal fuente de energía a nivel mundial. No fue hasta la crisis del petróleo de 1973 cuando las energías renovables comenzaron a ser consideradas como fuentes de energía a tener en consideración. Entonces comenzó una aceleración en las líneas de investigación y desarrollo tecnológico de las energías renovables como la eólica o la solar pero otras fuentes de energía renovable como las energías oceánicas quedaron en un segundo plano. Aunque los primeros prototipos y patentes de las energías oceánicas datan del siglo XX [1], es a partir del inicio del siglo XXI [2]- [3] cuando las energías oceánicas han empezado a tener un papel relevante en las agendas en materia de política energética a nivel mundial, los objetivos de reducción de emisiones de gases efecto invernadero y, el uso de las energías renovables oceánicas como herramienta para lograrlo, han hecho girar la mirada al mar y sus recursos.

Las energías renovables oceánicas se clasifican en seis tipos: energía de las mareas o mareomotriz, energía de los gradientes térmicos oceánicos (OTEC), energía osmótica, energía eólica marina, energía de las corrientes y energía de las olas o undimotriz [4]. En la presente tesis doctoral se realizará el estudio de la energía de las olas o energía undimotriz que se define como el aprovechamiento de la energía que generan las olas de manera natural.

### 2.1.1 Las olas como recurso energético.

#### 2.1.1.1 Origen de la energía de las olas.

Podemos definir las olas como un derivado terciario de la energía solar. Parte de la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra provoca desplazamientos de aire (viento), el rozamiento de ese aire con la superficie del mar provoca lo que conocemos por oleaje. Supuesta una constante solar del orden de  $375 \text{ W/m}^2$ , aproximadamente  $1 \text{ W/m}^2$  se transmite al oleaje que actúa como un **acumulador de energía** [5].

Podemos definir que en el mar en general existen dos tipos generales de ondas, las estacionarias y las progresivas o transitorias.

A su vez, las olas se pueden clasificar atendiendo a su *fuerza perturbadora*, según la cual las olas pueden ser generadas por distintos fenómenos como: la acción del viento, los terremotos y tormentas, el sol/luna. Las **olas debidas al viento** son las que **más potencial energético** presentan y por lo tanto son las utilizadas para aprovechar su energía para obtener electricidad.

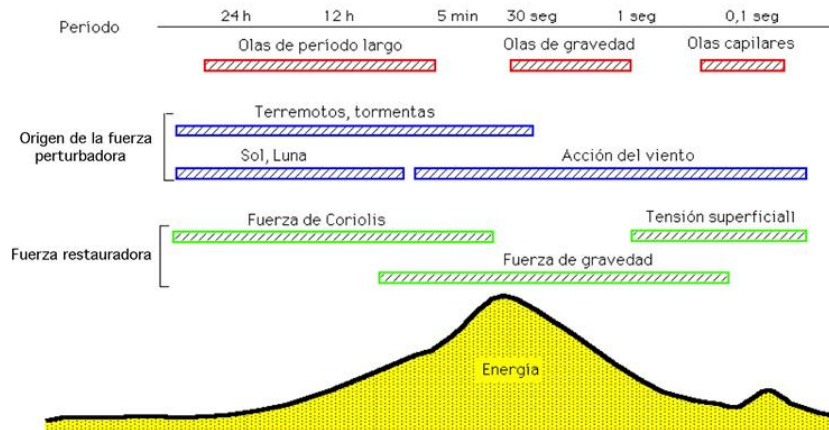


Figura 1. Representación de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida [5].

El viento produce desplazamientos que generan perturbaciones de pequeña longitud, llamadas *olas capilares*. A partir de estas pequeñas turbulencias aparecen sobrepresiones en un lado y subpresiones en el lado opuesto provocando una fuerza neta sobre la ola y transfiriendo energía desde el viento a la ola. Este fenómeno provoca que la amplitud y la longitud de la onda de la ola formando las llamadas *olas de gravedad* que son las que se utilizan para la generación de energía eléctrica.

### 2.1.1.2 Potencial energético de la energía de las olas.

Una vez determinado el tipo de ola se procede a calcular el potencial energético y la energía que contiene. A efectos de estudio se puede considerar que el oleaje es regular, aunque en la realidad el oleaje es irregular. Existen dos teorías de estudio para el oleaje regular: la teoría de ondas lineal y la teoría de ondas no lineal [5]. La teoría de ondas lineal considera el oleaje de forma regular y sinusoidal, mientras que la teoría de ondas no lineal recurre a la teoría de Stokes o la teoría de onda solitaria.

A continuación, se procede a caracterizar las expresiones de cálculo del potencial energético y la energía contenida en un oleaje, tanto regular como irregular. Para el caso del oleaje regular vamos a hacer uso de la teoría de ondas lineal.

#### 2.1.1.2.1 Cálculo del potencial energético ante un oleaje regular.

Los parámetros que caracterizan un determinado oleaje según la teoría de ondas lineal son:

- Profundidad ( $h$ ), distancia al fondo marino.
- Período de la ola ( $T$ ), es el tiempo entre dos crestas.
- Longitud de onda ( $L$  o  $\lambda$ ).
- Altura de la ola ( $H$ ).
- Velocidad de onda o celeridad ( $C=L/T$ ).
- Número de onda ( $k=2\pi/L$ ).
- Velocidad angular ( $w=2\pi/T$ ).

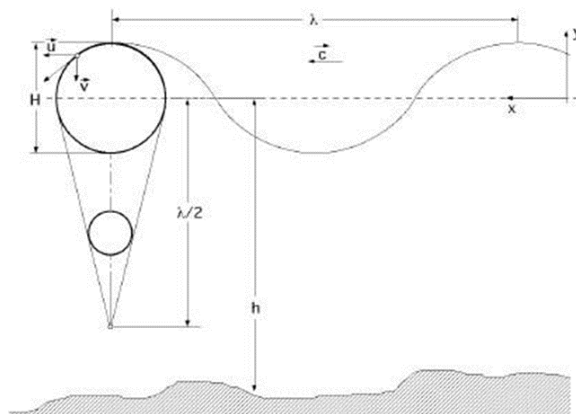


Figura 2. Parámetros que caracterizan el oleaje según la teoría de ondas lineal [5].

A partir de estos parámetros y considerando a efectos de estudio aguas profundas y regulares se obtienen las expresiones que caracterizan la energía perteneciente a una ola y la potencia por unidad de frente de ola.

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y de energía potencial; en las olas regulares, los valores de la longitud de onda ( $L$  o  $\lambda$ ) y el período ( $T$ ) permanecen constantes. Por lo tanto, la energía contenida en una ola regular es la suma de su energía cinética y su energía potencial, siendo en el caso de aguas profundas  $E_c = E_p$  obtenemos que la energía total contenida en una ola regular es (Ecuación 1) en función de la altura de ola  $H$  (m) y el período  $T$  (s):

$$\Delta E = \frac{\rho g H^2 T^2}{32\pi}$$

*Ecuación 1. Energía contenida en una ola regular según teoría de ondas lineal [5].*

A su vez la potencia por unidad de frente de ola es:

$$P = \frac{\Delta E}{T} = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi}$$

*Ecuación 2. Potencia por unidad de frente de ola en un oleaje regular según la teoría de ondas lineal [5].*

#### 2.1.1.2.2 Cálculo del potencial energético ante un oleaje irregular.

En la teoría de ondas lineal se considera el oleaje como un tren de olas que es regular y sinusoidal, pero en la realidad no es así. El oleaje real es el producto de la suma o superposición de componentes del oleaje de diferentes períodos y alturas de ola que dan como resultado registros complejos.

Este espectro de componentes de distinta amplitud y frecuencia viene caracterizado por los siguientes dos parámetros: la altura significativa de ola ( $H_s$ ) en metros y el período pico ( $T_p$ ) en segundos.

La altura significativa de ola ( $H_s$ ) es la altura media del tercio de olas más altas. Es decir, si se presenta un registro de oleaje con distintas alturas de olas en metros, el tercio más altas serán las que presenten mayor valor del total de los valores divididos en tres tercios y la altura significativa de ola  $H_s$  será la media aritmética de esos valores.

El período pico ( $T_p$ ) es aquel donde se encuentra el máximo en la distribución de frecuencias del espectro de oleaje.

Para calcular la potencia por unidad de frente de ola se tendrán en cuenta todas las frecuencias, así como la densidad de probabilidad del espectro de frecuencias asociado a un cierto oleaje y la denominada velocidad de grupo ( $C_g$ ), definida como la velocidad a la que se desplaza la ola y a la que se transmite la energía.



Las consideraciones de cómo operar con los espectros de oleaje han sido evaluados por diferentes autores siendo el modelo de Pierson Moskowitz [6] el más utilizado debido a su simplicidad. En dicho modelo se asume que el viento sopla de forma estable en una zona y las olas generadas llegan a un equilibrio. Es lo que se denomina un mar completamente desarrollado.

Según el modelo de Pierson Moskowitz, la potencia por unidad de frente de ola en función de la altura de ola ( $H_s$ ) en metros y del período energético ( $T_e = 0.87T_p$ ) en segundos es (Ecuación 3):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e = 0.493 \cdot T_e \cdot H_s^2$$

*Ecuación 3. Potencia por frente de ola en un oleaje irregular en función del espectro Pierson Moskowitz [6].*

### 2.1.2 Tecnologías de captación de la energía de las olas.

Dentro de este apartado se describirán los sistemas de extracción para realizar el aprovechamiento de la energía presente en las olas.

Una vez determinado el potencial energético del recurso undimotriz es necesario el desarrollo de tecnologías que realicen su aprovechamiento y conversión en energía eléctrica.

Para absorber energía útil de un fluido es necesario que dicho fluido realice un trabajo; por lo tanto, para que exista una transferencia de energía las olas tienen que ejercer una fuerza sobre un cuerpo móvil. De esta forma el cuerpo móvil o absorbedor es el lugar donde se produce la transferencia de energía. Esta energía puede almacenarse en el cuerpo como energía cinética o como energía potencial.

En el proceso de extracción de energía aparecen tres fuerzas distintas sobre el sistema de extracción: la fuerza de excitación, la de radiación y la del sistema de extracción de energía. La fuerza de excitación es consecuencia de la acción de la onda incidente sobre una estructura fija, la de radiación se origina cuando el fluido se opone al movimiento del cuerpo. Estas dos fuerzas no son controlables.

El objetivo de estos sistemas de extracción o tecnologías de captación es la transformar la energía de las olas en energía útil de manera eficiente en las distintas frecuencias del oleaje y además deben ser capaces de adaptarse y resistir a las complicadas condiciones de operación en medio marino.

### 2.1.2.1 Clasificación.

En este apartado vamos a describir cómo se clasifican las tecnologías de captación de energía del oleaje. En la actualidad se presentan cinco tipos de sistemas para extraer la energía de las olas [4], que son (ver Figura 3):

- Flotadores. Anclados en el fondo o unidos a una masa sumergida.
- Depósitos. Almacenan agua aprovechando la energía cinética de las olas. El agua vuelve al mar tras pasar por una turbina.
- Balsas o pontones. Aprovechan el movimiento relativo con el oleaje.
- Neumáticos. Las olas comprimen y descomprimen un flujo de aire que mueve una turbina.
- Dispositivos móviles articulados. Se mueven con las olas actuando sobre un motor hidráulico.

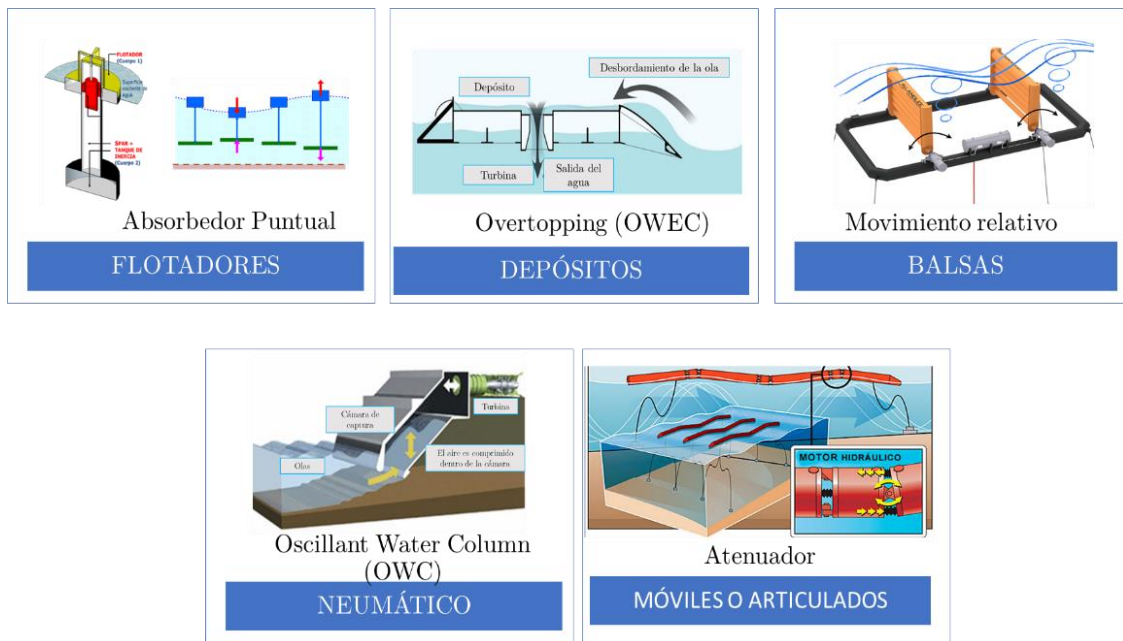


Figura 3. Clasificación general tecnologías de captación de la energía del oleaje. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de otras energías renovables, como la energía eólica o la energía solar fotovoltaica, la energía de las olas presenta muchas soluciones tecnológicas.

A su vez estas soluciones tecnológicas pueden clasificarse dependiendo de: su posición relativa respecto a la costa, atendiendo a la orientación o la posición relativa respecto al frente de ola, atendiendo al modo de oscilación, atendiendo a la posición relativa respecto del agua de los convertidores, atendiendo al uso final de la energía, atendiendo al modo de obtención de la energía, atendiendo al tipo de energía que se aprovecha y al rendimiento de la extracción y atendiendo al principio de funcionamiento [7].

A continuación, se describirán brevemente las clasificaciones más utilizadas: dependiendo de su posición relativa respecto a la costa, atendiendo a su posición relativa respecto al frente de ola y atendiendo a su principio de funcionamiento.

Según su **posición relativa respecto a la costa** se clasifican en: en la costa (onshore), cerca de la costa (nearshore) entre 10-40 metros y mar adentro (offshore) más de 50 metros.

Según su **orientación respecto al frente de ola** se encuentran: los totalizadores o terminadores que son de forma alargada y que se colocan perpendicularmente a la dirección de avance de la ola, los atenuadores también de forma alargada pero la ola incide paralelamente a ellos captando de manera progresiva la energía y los absorbedores puntuales que se colocan varios dispositivos agrupados siguiendo una línea y concentrando el oleaje en un punto (Figura 4).

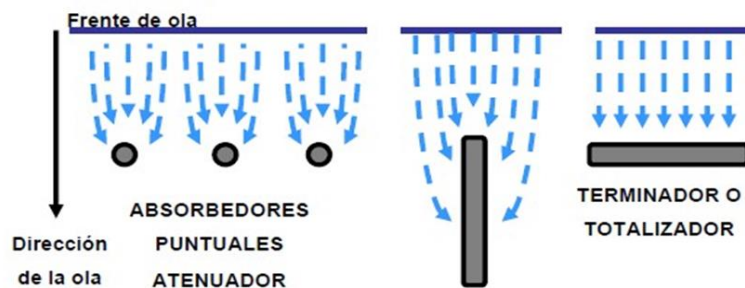


Figura 4. Clasificación de los sistemas de captación según la orientación.



Figura 5. Clasificación de tecnologías de conversión en función de su principio de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia a partir de [4] [7].

Según el **principio de funcionamiento** se clasifican en [4]: dispositivos de columna de agua oscilante Oscillating Water Column (OWC), dispositivos oscilantes y dispositivos

convertidores de energía potencial. En la Figura 5 se resume esta clasificación junto con ejemplos de tecnologías I+D actuales y en desarrollo.

### 2.1.2.2 *Sistemas de conversión energética.*

Determinada la clasificación de las tecnologías se presenta en este apartado el proceso de conversión energética y qué sistemas intervienen en el proceso.

La transformación de energía en energía útil se clasifica en dos tipos: la conversión primaria y la conversión secundaria. La conversión primaria es la conversión del movimiento de las olas en el movimiento de un cuerpo mediante un sistema neumático o mecánico. La conversión secundaria es la conversión de la energía del fluido en energía útil, como por ejemplo electricidad. La conversión secundaria se realiza a través de dos sistemas: un sistema mecánico intermedio y un sistema de generación de energía eléctrica.

A su vez el sistema mecánico intermedio utilizado, Power Take Off (PTO) en sus siglas en inglés, puede ser mecánico puro, con turbinas de aire o de agua, sistemas hidráulicos o sistemas de arrastre directo. Siendo los más implementados los sistemas hidráulicos y los sistemas de arrastre directo.

Los sistemas hidráulicos tienen poco volumen y son versátiles, pero son poco fiables tienen un elevado coste y bajo rendimiento.

Los sistemas con accionamiento directo son una buena solución dada la simplicidad del sistema. Consiste en un mecanismo en el que el motor hace girar el eje directamente, sin engranajes intermedios.

Con respecto a la conversión final de energía mecánica en energía eléctrica se utilizan los sistemas de generación de energía eléctrica.

Dada la alta variabilidad de la frecuencia del oleaje es totalmente necesario utilizar un sistema de velocidad variable [8].

Los **sistemas de generación de energía eléctrica** con mayor aplicabilidad en las tecnologías de generación undimotriz son:

- Máquina de inducción presente en las tecnologías tipo OWC.
- El generador síncrono a velocidad variable resultado de la modificación de un generador convencional que permite la generación a tensión y frecuencia constantes independientemente de la velocidad. Es aconsejable este tipo de generador a gran escala, pero no para redes pequeñas en islas.
- El generador de corriente alterna siempre que se rectifique posteriormente la corriente continua.

- El generador eléctrico lineal que extrae energía en forma de un movimiento oscilante a velocidad reducida [9].

Independientemente del sistema de generación de energía eléctrica se necesita un convertidor electrónico de potencia que permita el acoplamiento del generador a la red.

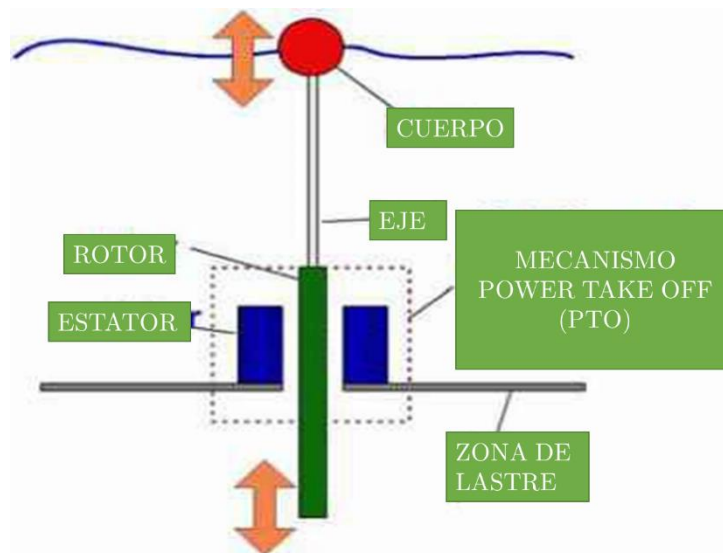


Figura 6 Esquema de convertidores de energía de olas con sistema de arrastre directo. Soluciones tecnológicas [10].

A continuación, y debido a la diversidad en la clasificación de las tecnologías de captación, se describen aquellos más relevantes debido a su madurez y grado de desarrollo tecnológico actual.

#### *Dispositivo de columna de agua oscilante (OWC).*

Teniendo en cuenta la clasificación relativa a la posición relativa a la costa el OWC es una tecnología de captación que se instala en la costa. El principio de funcionamiento se basa en el efecto que producen las olas en una columna de agua que sube y baja dentro de una cámara, produciendo una compresión y expansión de un volumen de aire que queda por encima de dicha columna de agua. Este aire es empujado por una turbina, generalmente bidireccional como por ejemplo las turbinas Wells.

La ventaja principal de este tipo de sistemas es su procedimiento de instalación, explotación y mantenimiento y como desventaja están la baja densidad de energía del oleaje que llega a la costa, y por lo tanto el bajo rendimiento del sistema.

Este tipo de sistemas se han utilizado como solución tecnológica en puertos marítimos. Así tenemos como ejemplos la instalación que posee el Ente Vasco de la Energía (EVE) en Mutriku (España) [11] con una instalación de 16 turbinas de 30kW realizadas por WAVEGEN o la instalación de la central de PICO en las islas Azores (Portugal) [12].





Figura 7. Estructura OWC en el Puerto de Mutriku (España) y Dispositivo OCEANTEC.

Pero este tipo de dispositivos pueden combinarse con otras soluciones tecnológicas por ejemplo los absorbedores puntuales, con lo que resulta una tecnología no necesariamente para su disposición en localizaciones en la costa, sino que también puede instalarse en alta mar, como ocurre con el dispositivo desarrollado por la empresa OCEANTEC.

#### *Dispositivos que aprovechan el empuje horizontal.*

Este tipo de dispositivos se instalan en aguas poco profundas utilizando el desplazamiento vertical del oleaje. El principio de funcionamiento se basa en el movimiento de una plataforma horizontal del oleaje. La plataforma está unida a una estructura fijada en el fondo marino mediante una unión articulada. El sistema de extracción de potencia se dispone de esa articulación o un pistón que la parte fija de la parte móvil. Tecnologías ejemplo de esta tipología de tecnologías de captación son el Waveroller de AQUAMARINE POWER [13], el Oyster Wave Energy [14] o el Langlee Wave Power [15].



Figura 8. Dispositivos de empuje horizontal: Waveroller, Oyster, Langlee.

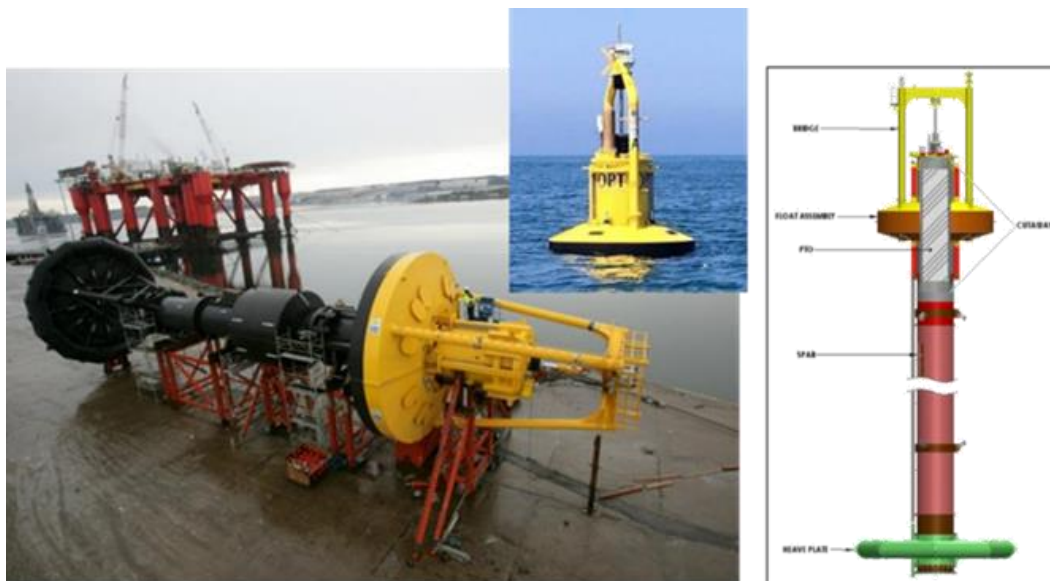
### *Dispositivo absorbedor puntual.*

En el caso de los absorbedores puntuales se presentan distintas variaciones dependiendo del principio de funcionamiento. Se trata de un cuerpo flotante con un comportamiento oscilatorio de arriba y abajo debido al oleaje y reaccionando sobre un segundo cuerpo que puede estar fijo al fondo o semisumergido.

Existen absorbedores puntuales de un cuerpo y de dos cuerpos. Los absorbedores puntuales de dos cuerpos tienen un de ellos semisumergido, también moviéndose por efecto del oleaje, y alcanzando una velocidad relativa entre ellos. El movimiento relativo de dichos cuerpos es utilizado por el sistema de extracción de potencia, el llamado *Power Take Off (PTO)* en sus siglas en inglés, para generar electricidad. Como PTO se utiliza un sistema hidráulico o un sistema de arrastre directo, conectando un generador eléctrico lineal directamente para transformar el movimiento vertical en electricidad.

Tecnologías ejemplo son las tecnologías de captación Ocean Power Technologies (OPT) [16], Corpower [17] o Wedge Global [18]

Para profundizar más dentro de la clasificación de los dispositivos convertidores se recomienda la página AQUA\_RET [19] en donde se pueden encontrar recursos didácticos que contribuyen a ampliar la información expuesta en el presente apartado.



*Figura 9. Absorbedor puntual de Ocean Power Technologies.*

### 2.1.3 Integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica.

Se denominan parques de generación undimotriz al conjunto de convertidores de energía de olas que, con una cierta configuración se conectan a un punto de la red eléctrica y comparten una infraestructura de conexión.

Los elementos fundamentales para la integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica se describen brevemente en el presente apartado.

La conexión a red se produce a través de los siguientes elementos: el sistema de extracción o PTO junto con su electrónica de potencia asociada, el cable submarino y si es necesario un centro de transformación submarina (si la granja está a poca distancia de la costa no es necesario).

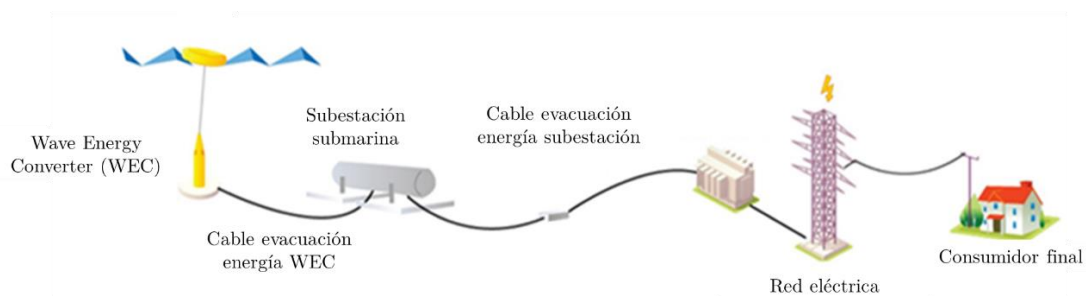


Figura 10. Esquema elementos integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica.

La adaptación de la potencia a la red se realizará utilizando **convertidores electrónicos** y se realizará en dos etapas. En primer lugar, la potencia obtenida por cada generador se transforma a tensión continua (DC) para después mediante un inversor de red volver a ser transformada en corriente alterna trifásica (AC) con los niveles de tensión y frecuencia requeridos por el operador del sistema para poder ser inyectada a red. Generalmente como cada captador tiene su propio sistema de generación de energía eléctrica lleva también asociado su propio convertidor electrónico de potencia para transformar a tensión continua.

Los elementos destacables a la hora de la integración en red y que difieren de otro tipo de energías renovables son el cable submarino y el centro de transformación submarino. Este tipo de elementos son también utilizados por otras tipologías de energía renovables oceánicas como la energía eólica offshore.

El cable submarino es una solución de alta tensión para el transporte de potencia. Este transporte se puede hacer tanto en corriente continua (DC) como en corriente alterna (AC). Para distancias menores a 80 km a la costa se suelen hacer el transporte en corriente alterna (HVAC), a la salida del parque se encontrará instalado un convertidor DC/AC. El transporte en corriente continua (HVDC) es utilizado para largas distancias donde el nivel de potencia es elevado.



#### 2.1.4 Situación actual de la energía undimotriz.

En el informe realizado por la European Commission JRC Ocean Energy Status Report (2016) [20] se resumen los aspectos más relevantes en relación al estado actual y desarrollo tecnológico de la energía undimotriz en el mundo.

La Comisión Europea ha reforzado su apoyo al desarrollo de la energía undimotriz ya que se ha identificado como un área tecnológica clave dentro del Plan Estratégico de Tecnología Energética de la Unión Europea.

Los principales obstáculos a los que se enfrenta el sector de la energía undimotriz son: el desarrollo tecnológico, la financiación de proyectos y las concesiones de licencias para proyectos.

La energía de las olas aún no ha demostrado la generación de electricidad consistente siendo el nivel alcanzado con éxito el de prototipo. La fiabilidad, la disponibilidad y la supervivencia son las tres áreas que los desarrolladores de tecnologías de energía undimotriz están abordando actualmente. La instalación de tecnologías de generación undimotriz se está llevando a cabo a un ritmo más lento de lo esperado. Europa sólo presenta 14MW de capacidad instalada en energías oceánicas a finales del 2016, muy por debajo de los objetivos planteados por los estados miembros en sus Planes Nacionales de Acción sobre Energías Renovables. Se esperaba que 641MW de energías oceánicas estuvieran operativos para el 2016. Para 2020 superando las barreras tecnológicas y financieras se esperaba alcanzar los 65MW de capacidad de energía undimotriz, teniendo en cuenta que solamente 37MW de los mismos han sido financiados con fondos públicos. Los próximos años serán fundamentales para la consolidación de las tecnologías y los mercados de las energías oceánicas y la energía undimotriz en particular. Como ejemplo de apuesta por parte de los estados miembros europeos de este tipo de energía renovable se encuentra el caso de España que, dentro de su planificación energética nacional ha planteado como objetivo la integración en el parque de generación renovable nacional 25 MW de potencia instalada de energías oceánicas para 2025 y 50MW para 2030 [21].

La Unión Europea está a la vanguardia del desarrollo tecnológico ya que presenta el 60% de los desarrolladores tecnológicos de energía undimotriz. La mayor parte de las infraestructuras de energía oceánica, así como los centros de pruebas de energías oceánicas también se encuentran en la Unión Europea. Parte de la tecnología europea se está utilizando en proyectos de demostración en otros puntos del planeta como Estados Unidos, Canadá o Australia.

La cadena de suministro se extiende por toda Europa, y se espera que la creación del mercado de la energía undimotriz afecte positivamente a muchos sectores productivos de la economía europea. Un gran número de mecanismos de apoyo implementados a nivel europeo, nacional y regional están apoyando actualmente el desarrollo de la energía

undimotriz, desde la investigación y el desarrollo hasta la demostración. Si bien es necesario creas instrumentos adicionales e innovadores para superar las barreras específicas y apoyar proyectos de demostración, el compromiso de la Comisión Europea al impulso de la energía undimotriz es firme y se espera que sea una realidad comercial en un corto espacio de tiempo.

A continuación, se va a resumir los avances más significativos de las tecnologías. En base a las Technology Readiness Levels (TRL) [22] o niveles de madurez de las tecnologías oceánicas (Tabla 1), a finales del 2016 sólo unos pocos dispositivos han llegado con éxito a alcanzar el nivel TRL7-8 correspondiente al ensayo en entorno real de operación real.

<b>Technology Readiness Levels (TRL)</b>	
<b>TRL 1</b>	Idea Básica
<b>TRL 2</b>	Concepto o tecnología formulados
<b>TRL 3</b>	Prueba de concepto
<b>TRL 4</b>	Validación a nivel de componentes en laboratorio.
<b>TRL 5</b>	Validación a nivel de componentes en entorno relevante.
<b>TRL 6</b>	Validación del sistema o subsistema en un entorno relevante.
<b>TRL 7</b>	Validación de sistema en un entorno de operación real.
<b>TRL 8</b>	Validación y certificación completa en un entorno de operación real.
<b>TRL9</b>	Pruebas de éxito en un entorno real.

Tabla 1. Niveles de madurez. *Technology Readiness Levels (TRL)*. Fuente: *Elaboración propia a partir de [22]*.

Según el Foro de Energía Oceánica el enfoque para la industria de la energía de olas debe pasar por la demostración de los prototipos existentes y mejorar el rendimiento de los subsistemas y componentes clave para aumentar la fiabilidad general del dispositivo y su supervivencia. Los tipos de dispositivos que presentan un desarrollo tecnológico más avanzado son la columna de agua oscilante (OWC) y los absorbedores puntuales con algunos dispositivos específicos en la TRL7-8 (Figura 11). Otros dispositivos como los de sobretensiones de columna de agua oscilante (OWSC) o los de masa giratoria han alcanzado un TRL relativamente alto y se espera que sigan avanzando en los TRL. En cambio, no se han observado progresos significativos en algunas tecnologías específicas como los atenuadores o los dispositivos de diferencia de presión (SPD).

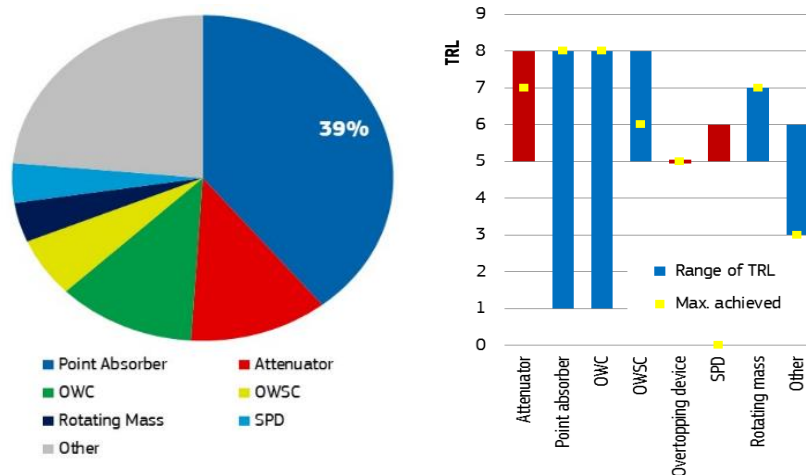


Figura 11. Porcentaje por tipo de dispositivos de energía de undimotriz más utilizado y rangos de TRL [20].

Entre 2014 y 2016 se han instalado un número limitado de proyectos, la mayoría incluyen dispositivos de pequeño tamaño (potencia nominal 50 kW) y un número limitado de dispositivos con mayor potencia nominal como el CETO5 (240 kW, el WaveRoller (300kW) o el W1 (200kW). Hasta el momento la matriz de dispositivos de Carnegie CETO5 instalada en Australia representa la matriz de energía undimotriz más avanzada en funcionamiento, habiendo contabilizado más de 14000 horas de operación desde el despliegue de los tres dispositivos a finales del 2015. A pesar de la elevada TRL alcanzada por algunos dispositivos su preparación comercial aún está por demostrar. La mayoría de los dispositivos aún deben considerarse prototipos avanzados que han demostrado la supervivencia a las condiciones oceánicas, pero con generación limitada de electricidad.

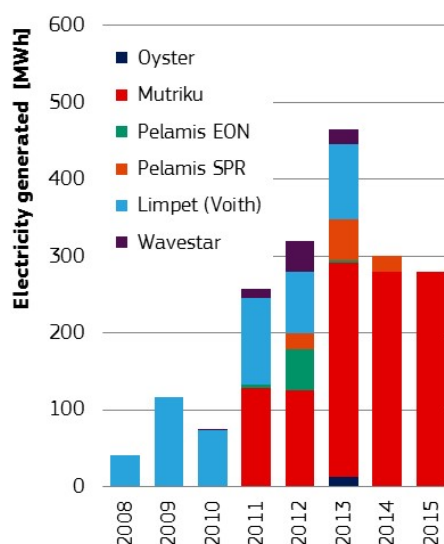


Figura 12. Generación de electricidad por energía undimotriz en Europa [20].

Quince de los proyectos en energía undimotriz en desarrollo se ubican en el llamado Espacio Atlántico Europeo, y muchos se están llevando a cabo en islas. Aunque en conjunto de las instalaciones actuales no supera la potencia nominal de 1MW. Se han identificado 57 empresas en el desarrollo de proyectos de energía de ola, 40 de las cuales están en la fase inicial de desarrollo.

En relación con la generación de electricidad varios dispositivos han entregado electricidad a la red. Hay información limitada disponible con respecto a la generación de electricidad. En la Figura 12 se ofrece una visión general de la energía generada por los dispositivos de energía undimotriz. Hasta la fecha la clase de dispositivos que más electricidad han entregado a la red son los OWC. La planta de Pico de 400kW ha entregado más de 70MWh a la red durante 3100 horas de funcionamiento. La OWC de 500kW en Limpet ha producido unos 600MWh desde 2006 a 2013. El OWC de Mutriku produce alrededor de 300MWh al año un hito para la industria de la energía de las olas. Hasta ahora no ha habido ningún dispositivo que haya sido capaz de suministrar electricidad a la red de forma continuada (más de doce meses consecutivos) aparte de los OWC.

Los factores de capacidad de los dispositivos undimotrices son bajos, alcanzando un 25% en el caso del OWC y el 10% para otros tipos de dispositivos. Para que sean competitivos técnica y económicamente deben alcanzar entre el 30-40%.

Comprender los progresos realizados por estas tecnologías a lo largo de los años puede ayudar a evaluar las necesidades y metas de I+D para los próximos años.

Proyecto	País	Localización	Capacidad Máxima	Tipo de Tecnología	Dispositivo	Estado
Pico	Portugal	Azores	400kW	OWC	OWC	En Operación. Para ser dado de baja
Limpet	Reino Unido	Islay	500kW	OWC	Voith Hydro Wagon	Operaciones suspendidas
WaveHub	Reino Unido	Cornwall	10MW	Absorbedor Puntual	Seatricity Oceanus 2	Actualmente dos dispositivos instalados. Sin conexión a la red.
Sotenäs	Suecia	Västra Götaland	10MW (modular)	Absorbedor puntual	Seabased	Primeros dispositivos desplegados (1MW)
Perth Project	Australia	Perth	0,72MW (modular)	Absorbedor puntual	Carnegie CETO5	Tres unidades fueron desplegadas
Ghana	Ghana (África)	Ada	14MW	Absorbedor puntual	SeaBased	Primeros 6 dispositivos y conexión a red instalada
WaveStar	Dinamarca	Hanstholm	0,6MW	Absorbedor Puntual	WaveStar	Conectado a red desde 2010 prototipo a escala 1:2
Mutriku	España	Mutriku	0,3MW (modular)	OWC	16 OWC (18,5kW)	Operando desde 2011. Una cámara es usada para investigación y desarrollo.
Isla de Muck	Reino Unido	Isle de Muck	22 kW (modular)	Atenuador	Albatem	3 unidades instaladas
Westwave	Irlanda	Killard	5MW (modular)	Por determinar	5 proveedores preseleccionados,	Previsto para 2018
Fred Olsen	Estados Unidos	Navy Test Centre, Hawaii	23kW	Absorbedor puntual	Fred Olsen Life Saber	Dispositivo conectado a red operando un 30% (6,7 kW)
Azura Wave	Estados Unidos	Navy Test Centre, Hawaii	20 kW	Absorbedor puntual	Northwest Energy Innovations	Prototipo a escala 1:2. Generando electricidad desde 2015
Oceantec	España	Bimep	30 kW	OWC	Oceantec Marmok-A5	Instalado en octubre 2016
40SouthEnergy	Italia	Marina di Pisa	100 kW	OWSC	H24 from 40Southenergy	Dispositivo instalado a finales de 2015

PB3	Estados Unidos	New Jersey	3 kW	Absorbedor puntual	PB3	Dispositivo instalado en 2016
Wave4Power	Noruega	Runde	N/A	Absorbedor puntual	WavEel	Dispositivo instalado en febrero 2016
Eco Wave Power	Reino Unido	Gibraltar	100kW (modular)	Absorbedor puntual	Wave clapper	Dispositivo instalado y en operación junio 2016
Seapower	Irlanda	Galway Bay	N/A	Atenuador	Seapower Platform	Prototipo escala 1:4 en período de prueba
CEFOW	Reino Unido	EMEC	3MW	Masa Rodante	3x Wello Penguins (1MW)	Instalación por fases 2017 - 2019
Corpower	Reino Unido	EMEC	25kW	Absorbedor puntual	1x25kW Corpower	Ensayado en EMEC
Swell	Portugal	Peniche	5,6 MW (modular)	OWSC	WaveRoller	16 dispositivos en 2018
CETO6	Australia	Garden Island	4MW (modular)	Absorbedor puntual	Carnegie CETO6	Dispositivo 1MW y en fase de desarrollo 3MW
CETO6 Wave Hub	Reino Unido	Cornwall	15 MW (modular)	Absorbedor puntual	Carnegie CETO6	Dispositivo 1MW en 2017; 15MW en 2021
Camp Rilea	Estados Unidos	Oregon	40 kW	OWSC	Resolute Marine Energy	Pequeño proyecto de 2 dispositivos.
Baby Penguin	España	Islas Canarias	N/A	Masa rodante	Wello Penguin	Fiabilidad para el nuevo dispositivo
Wedge Global	España	Islas Canarias	200 kW	Absobedor puntual	W1	Dispositivo en fase de ensayo en mar

Tabla 2. Proyectos de demostración precomerciales y de primera clase de energía de olas [20].

## 2.2 Estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas.

En el presente apartado se describirán los conceptos básicos que definen la estabilidad de la frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) y en especial de los sistemas o redes eléctricas débiles, su normativa asociada y los conceptos más relevantes sobre los procedimientos de operación para su regulación.

### 2.2.1 Concepto de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia (SEP).

Se define como sistema eléctrico de potencia (SEP) al conjunto de instalaciones y equipos para producir, transportar y distribuir la energía eléctrica a los usuarios en una determinada localización. La función del SEP es la de abastecer de a todos los usuarios de energía eléctrica tan económicamente sea posible, en la cantidad deseada y con un nivel aceptable de calidad, seguridad en el suministro. Los SEP están formados por tres bloques principales: generación, transporte y distribución. Entre sus características hay que destacar que son altamente no lineales y operan en relación con los cambios de los elementos que lo conforman y la topología de la red.

Existen varias definiciones sobre qué se entiende por estabilidad de un SEP:

- “La estabilidad de un SEP es la capacidad que presenta el sistema para volver a unas condiciones iniciales de operación, retomando a un estado de operación aceptable después de experimentar una perturbación (cortocircuito, salida de líneas/transformadores, pérdida de generación, pérdida o aumento de la demanda) [23]”.
- “La estabilidad de toda máquina síncrona de mantener el sincronismo aun cuando se presente una perturbación [24]”.
- “Otra forma de explicar la estabilidad de un SEP es explicar cómo sus propiedades le permiten permanecer en un estado de equilibrio operativo, en condiciones normales de operación y recuperar un estado aceptable de equilibrio después de ser sometido a una perturbación [25]”.

La pérdida de estabilidad de un SEP puede presentar alguna de las siguientes manifestaciones [23]:

- Pérdida del sincronismo entre los generadores ante un evento de cortocircuito y pérdida de capacidad de la red.
- Oscilaciones no amortiguadas con posterior pérdida de sincronismo de los generadores.
- Caída o aumento incontrolado de tensiones.

- Caída o aumento incontrolado de frecuencia.

Todas estas manifestaciones provocan la actuación de los equipos de protección/control para que no ocurra un colapso general del SEP.

La estabilidad de los SEP se puede clasificar en tres tipos [25](Figura 13): estabilidad de ángulo, estabilidad de tensión y estabilidad de frecuencia.

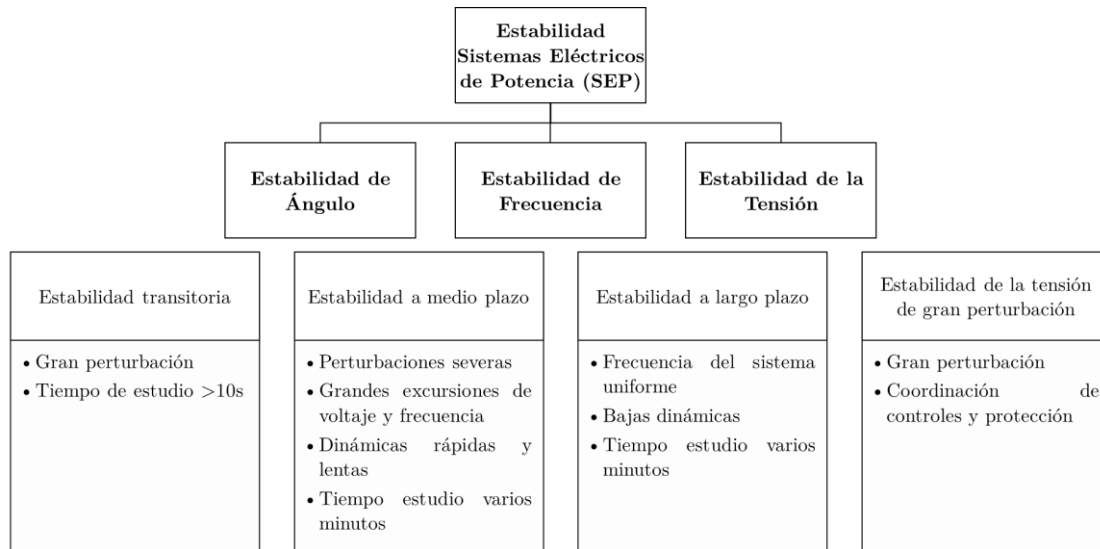


Figura 13. Clasificación Estabilidad SEP. Elaboración propia a partir de [25].

Tomando como base lo explicado en [26] para la clasificación de la estabilidad de los SEP se explicará brevemente los conceptos más relevantes sobre la estabilidad del ángulo y la estabilidad de la tensión y debido a que la estabilidad de la frecuencia es el tema central de estudio de la presente tesis doctoral se explicará con mayor profundidad en los siguientes apartados.

La estabilidad del ángulo es la condición de equilibrio entre el par electromagnético y eléctrico de una máquina síncrona en operación normal y cuando se somete a diversas perturbaciones.

Los problemas de estabilidad de ángulo se caracterizan en dos categorías [25]:

- De pequeña señal (estado estable): en donde se consideran perturbaciones pequeñas de tal forma que se permite la linealización de las ecuaciones. La ventana temporal de estudio es del orden de 10-20s después de ocurrida la perturbación.
- De gran perturbación (estabilidad transitoria): el sistema responde haciendo uso de los ángulos del rotor del generador y está condicionado por la relación no lineal



potencia-ángulo. La ventana temporal varía entre 3-5s después de ocurrida la perturbación.

La estabilidad de tensión está relacionada con la capacidad del sistema para mantener la tensión en los nudos de una determinada zona de la red dentro de los márgenes que aseguran un funcionamiento correcto en los equipos en ella conectados. A este fenómeno local es conveniente darle solución por medio de equipos conectados directamente al nudo donde ha ocurrido la perturbación o al nudo cercano a la red. La ventana temporal de estudio es de unos pocos segundos generalmente 10s.

Los problemas de estabilidad de tensión se caracterizan en dos categorías [25]:

- De gran perturbación: se relaciona con la habilidad del sistema para controlar tensiones debidas a grandes fallos, pérdidas de generación o grandes cortocircuitos. Esta propiedad se determina por las características e interacciones de control y las protecciones eléctricas del sistema.
- De pequeña perturbación: se relaciona con la habilidad para hacer control de tensión cuando existen pequeñas perturbaciones generadas por cambios de incremento de carga. Esta propiedad se determina por la característica de la carga y el tipo de control.

La estabilidad de la frecuencia es la habilidad del sistema para mantener la frecuencia en estado estable dentro de un rango nominal, después que ocurrido un desequilibrio entre potencia generada y demandada en un nodo de la red [25].

Debido a que la estabilidad de la frecuencia es el tema central de estudio de la presente tesis doctoral se explicará con mayor profundidad y se le dedicará un apartado diferenciado.

### 2.2.2 Estabilidad de la frecuencia en SEP.

Partiendo de la definición para la estabilidad de la frecuencia [25] dada en el apartado anterior en el presente apartado se describirán los conceptos, parámetros, normativa y procedimientos que servirán de base teórica para el análisis de la estabilidad de la frecuencia ante la integración de energía undimotriz en un SEP débil.

La estabilidad de la frecuencia está relacionada con el balance de potencia activa en cada uno de los nodos de la red. La potencia generada debe ser igual a la demandada por las cargas, más las pérdidas. Se parte de la ecuación dinámica de una máquina síncrona, descrita en la Ecuación 4.

$$P_m - P_e - K_D \cdot \frac{d\delta}{dt} = 2 \cdot H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

*Ecuación 4. Movimiento del rotor de una máquina eléctrica [27].*

Donde  $H$  es la constante de inercia,  $\delta$  es el ángulo de carga,  $P_e$  es la potencia electromagnética,  $P_m$  es la potencia mecánica, y  $K_D$  es el factor de amortiguación [27].

De la Ecuación 4 se deduce que la tasa de cambio en la velocidad de rotación de los generadores síncronos, y por lo tanto la frecuencia de la red, es directamente proporcional al desequilibrio instantáneo de generación y demanda e inversamente proporcional a la suma de las inercias proporcionadas por los grupos generadores [26].

Teniendo en cuenta las explicaciones teóricas resumidas en el trabajo “*Integración de energías renovables en Sistemas Eléctricos*” [28], se resumen las siguientes consideraciones respecto a la estabilidad de la frecuencia de red:

Aunque estrictamente la frecuencia de un sistema eléctrico sólo es la misma en todos sus nudos cuando el sistema se encuentra en régimen permanente, al estudiar el control frecuencia-potencia se asume que las desviaciones del punto de equilibrio son pequeñas y que la frecuencia puede considerarse la misma en todos los nudos del sistema. Por ello el control de frecuencia es un problema que se aborda de manera global.

La potencia generada en cada planta debe atender también a otros requerimientos además de la frecuencia, fundamentalmente compromisos adoptados durante el funcionamiento del mercado eléctrico. Estos compromisos se refieren tanto a la producción en cada planta como al intercambio de potencia entre áreas de control adyacentes.

Las transacciones de potencia en un instante determinado entre áreas quedan programadas con antelación, y cada área debe disponer de las suficientes reservas de potencia para hacer frente a sus posibles desequilibrios entre generación y demanda.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones relativas a la potencia, el control de frecuencia debe conseguir que:

- Se mantenga el equilibrio entre generación y demanda.
- Se mantenga la frecuencia de referencia en el sistema.
- Se cumplan los compromisos de intercambio de energía con las áreas vecinas.
- Se mantenga la suficiente energía de reserva.

#### *2.2.2.1 Normativa de operación y regulación de la estabilidad de la frecuencia en SEP.*

La estabilidad y control de la frecuencia de los SEP se rige por la normativa europea establecida por el *European Network of Transmission System Operators (ENTSO-E)* [29]. El *ENTSO-E* está formado por el conjunto de los 43 operadores del sistema europeos denominados *Electricity Transmission System Operators (TSOs)*, en el caso de España

el TSO correspondiente es *Red Eléctrica España (REE)* [30]. El *ENTSO-E* se ha comprometido a desarrollar propuestas adecuadas dentro del cambio de modelo energético que garanticen la seguridad del suministro. Uno de los objetivos prioritarios del *ENTSO-E* es el contribuir a la integración de las energías renovables en el sistema energético europeo apoyando lo establecido en la agenda europea de energía y clima [31].

Los TSOs correspondientes son los encargados de redactar y aplicar las normativas y procedimientos de operación siguiendo las directrices establecidas por el *ENTSO-E*.

En el caso de la normativa y procedimientos de operación relativos a la estabilidad de la frecuencia el *ENTSO-E* presenta varios documentos que son de interés para la realización del estudio que se plantea en la presente tesis doctoral. Así se encuentran:

- Dentro de “*Frequency ranges, ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection*” [32] se encuentran los valores establecidos por el *ENTSO-E* para los rangos de la frecuencia permitidos.
- Dentro de “*Continental Europe Operation Handbook*” [33] y en concreto en su capítulo “*P1-Policy1: Load-Frequency Control and Performance*” se encuentran recopilados los conceptos más relevantes sobre el control y regulación de la frecuencia de los SEP.
- Dentro de “*Continental Europe Operation Handbook*” [33] y en concreto en su capítulo “*P5-Emergency Operations*” se encuentran los conceptos más relevantes relacionados a las operaciones en emergencia, definiendo lo que se considera el estado normal de operación, estado de alerta y de emergencia del sistema.
- El documento “*Rate of Change of Frequency (ROCOF) withstand capability*” [33], guía para la integración por parte de los TSOs del concepto de *ROCOF*, en donde se resumen sus conceptos fundamentales.

Estos documentos han sido aplicados por el operador del sistema eléctrico español *REE* para la redacción de la normativa y procedimientos de operación y regulación de los parámetros que definen la estabilidad de los sistemas eléctricos españoles (peninsulares y no peninsulares) [34].

Dentro del conjunto de normativas enumeradas anteriormente se han resumido los principales conceptos en referencia a la estabilidad de la frecuencia de aplicación en el estudio realizado en la presente tesis doctoral. En la Figura 14 se resume el perfil de la frecuencia de una red eléctrica después de ocurrida una perturbación. En ella se representan los principales conceptos y parámetros que definen la estabilidad de la frecuencia de red: rangos de operación, tasa de cambio de frecuencia (*ROCOF*) o el punto mínimo alcanzado por la frecuencia (*NADIR*).

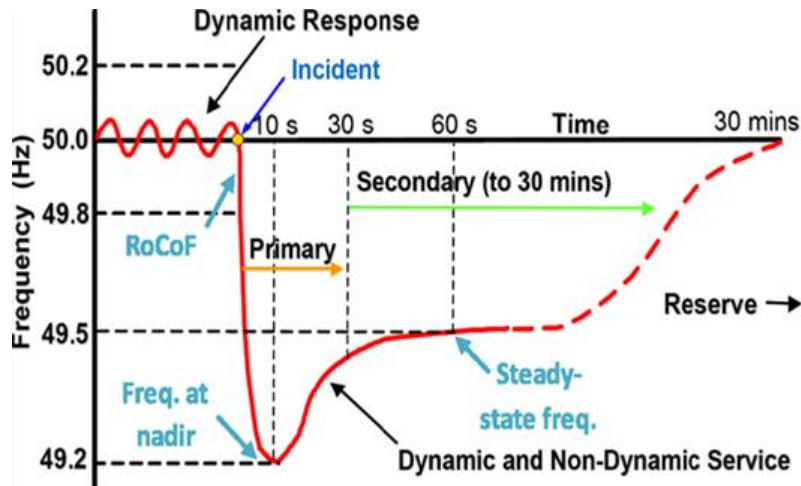


Figura 14. Perfil de frecuencia de una red después de ocurrida una perturbación [34].

De la Figura 14 se definen la clasificación de los estados de operación del sistema que se definen en relación con la red o los niveles de riesgo de carga/frecuencia y la urgencia de aplicar las medidas de regulación necesarias.

- **Estado normal** define una situación en la que el sistema está dentro de los límites de Seguridad Operacional en la N-Situación y después de la ocurrencia de cualquier Contingencia de la Lista de Contingencias, teniendo en cuenta el efecto de las Acciones Correctivas disponibles.
- **Estado de alerta** define el estado del sistema en el que el sistema está dentro de los límites de seguridad operacional, pero se ha detectado una contingencia de la lista de contingencias, y en caso de que ocurra, las acciones correctivas disponibles no son suficientes para mantener el estado normal.
- **Estado de emergencia** define el estado del sistema en el que se violan uno o más límites de seguridad operacional.
- **Estado de suspensión de suministro** comúnmente denominado apagón define el estado del sistema en el que se interrumpe el funcionamiento de parte o de la totalidad del sistema de transmisión.
- **Estado de restauración** significa el Estado del Sistema en el que el objetivo de todas las actividades en el Sistema de Transmisión es restablecer el funcionamiento del sistema y mantener la Seguridad Operacional después del Estado Apagón o el Estado de Emergencia.

Partiendo de la Ecuación 4, se puede definir el parámetro *Tasa de Cambio de Frecuencia*, en sus siglas en inglés *Rate of Change of Frequency (ROCOF)* (Ecuación 5). Se puede concluir de la Ecuación 4, que después de un desajuste de la potencia activa el *ROCOF* y la desviación de la frecuencia en estado estacionario ( $\Delta f_{ss}$ ) (Ecuación 6) dependen de la magnitud de  $P$ , la inercia  $H$ , la respuesta de frecuencia del sistema, la regulación de la capacidad  $R$  y la amortiguación  $K_D$ .

$$ROCOF = \frac{\Delta P}{2 \cdot H} = \frac{df}{dt}$$

Ecuación 5. Rate of Change of Frequency [27].

$$\Delta f_{ss} = \frac{\Delta P}{K_D + \frac{1}{R}}$$

Ecuación 6. Desviación de la frecuencia en estado estacionario.

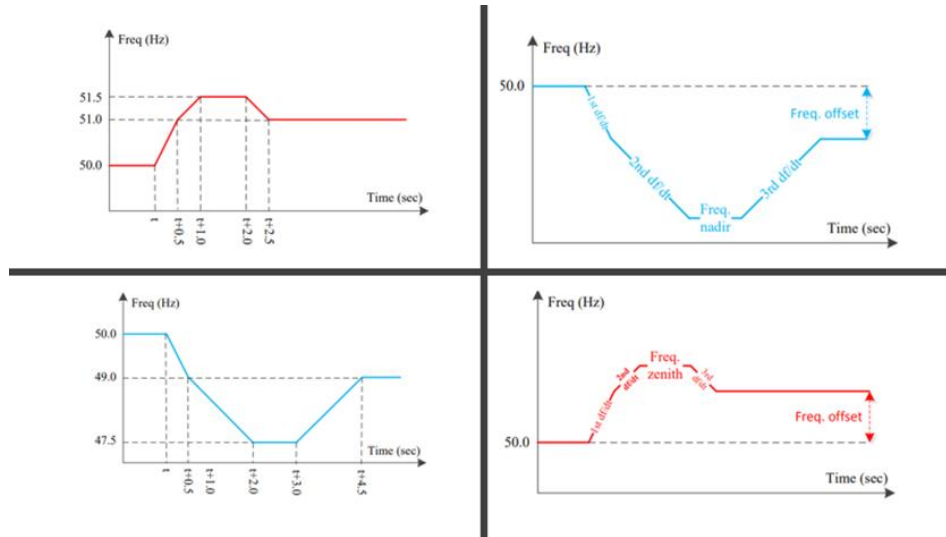


Figura 15. Propuestas del ENTSO-E para la determinación del ROCOF por parte de los TSOs [33].

En el caso de que se produzca una perturbación en la red que provoque un desequilibrio en la frecuencia en el cual la red no se encuentre en su estado normal de operación, se podrán en marcha los llamados procedimientos de operación de regulación y control del sistema hasta conseguir que el sistema eléctrico vuelva a su estado normal de operación dentro de los límites establecidos para los parámetros de estabilidad que se encuentran en la normativa anteriormente citada.

Existen tres procedimientos principales para la regulación de la frecuencia: la regulación primaria, secundaria y terciaria. Cada uno de los niveles opera en un margen de tiempo.

- **Regulación primaria.** Tiene por objetivo la corrección automática de los desequilibrios instantáneos que se producen entre la generación y el consumo. Es la más rápida, operando en un margen de tiempo de entre 2 y 20 segundos. Actúa de forma local en cada generador síncrono, atendiendo a la velocidad de giro del eje. La rapidez de este control está limitada por la propia inercia de los generadores.
- **Regulación secundaria.** Tiene por objetivo el mantenimiento del equilibrio generación-consumo, corrigiendo los desvíos respecto a los programas de intercambio previstos en la interconexión, y las desviaciones de la frecuencia, respecto al valor de consigna establecido. Opera en un margen de tiempo de entre

20 segundos y 2 minutos. Actúa en el ámbito del área de control, atendiendo a la frecuencia y al intercambio de potencia con las áreas vecinas.

- **Regulación terciaria.** Tiene por objetivo la restitución de la reserva de regulación secundaria que haya sido utilizada. Opera en un margen de tiempo superior a 10 minutos. Actúa en el ámbito de un sistema eléctrico extenso, buscando un reparto de cargas optimizado que asegure suficientes reservas de energía.

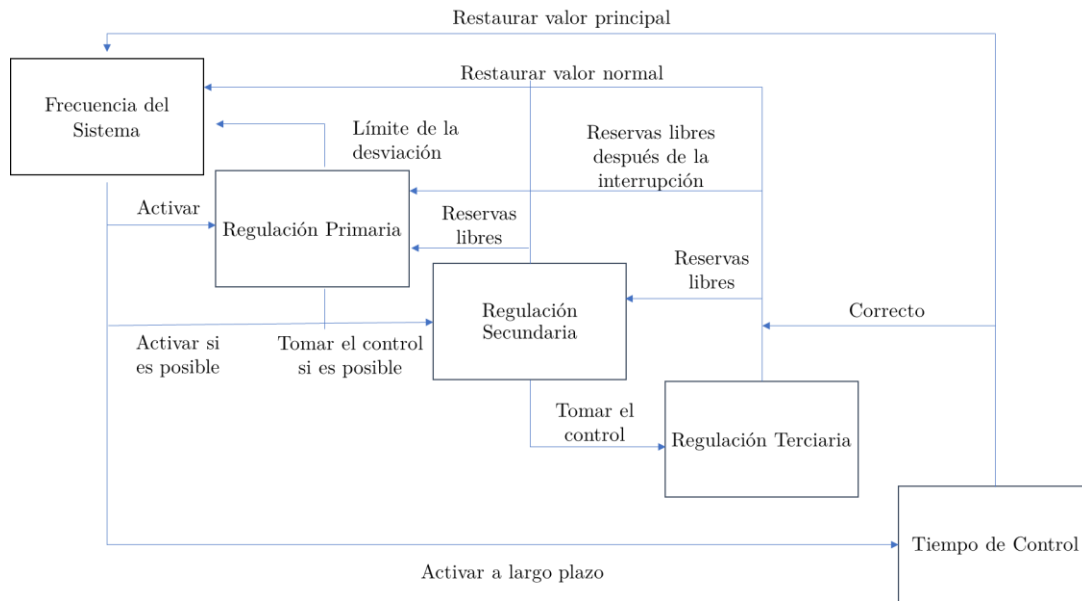


Figura 16. Esquema de control y acciones en relación con la regulación de la frecuencia ENTSO-E. Fuente: elaboración propia a partir de [33].

### 2.2.3 Estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas débiles.

Dentro de la presente tesis doctoral se realizará el estudio de estabilidad de la frecuencia en una red eléctrica débil ante la integración de la energía undimotriz por este motivo se ha considerado necesario dedicar un apartado diferenciado a los conceptos teóricos propios de las redes eléctricas débiles y que se han tenido en consideración durante el estudio desarrollado dentro de la presente tesis doctoral.

Dentro de la clasificación de los SEP se encuentran las llamadas redes eléctricas débiles. Las redes eléctricas débiles son redes de pequeño tamaño, generalmente aisladas y no interconectadas. En la tesis doctoral *“Análisis de algunos aspectos técnicos relacionados con la integración de energías renovables en sistemas eléctricos pequeños y aislados”* [35] encontramos dentro su Apéndice A un resumen de conceptos relativos a los sistemas eléctricos pequeños y aislados.

Así encontramos dentro del documento la Tabla 3 donde se resume la clasificación para las redes eléctricas débiles.

<i>Potencia instalada(kW)</i>	<i>Categoría</i>
<1	Microsistemas
1-75	Sistemas eléctricos de pequeñas poblaciones
10-500	Sistemas eléctricos de agrupaciones de poblaciones
500-5000	Sistemas eléctricos en islas
5000-120000	Grandes sistemas interconectados mediante enlaces con capacidad de potencia restringida

Tabla 3 Clasificación de los sistemas eléctricos aislados. Fuente: Elaboración propia a partir de [35].

Si se considera únicamente los territorios insulares, objeto de la presente tesis doctoral, en la Tabla 4 se resume su clasificación según la máxima demanda anual.

<i>Máxima demanda anual (MW)</i>	<i>Categoría</i>
<1	Islas de muy pequeño tamaño
1-5	Islas de pequeño tamaño
5-35	Islas de Mediano tamaño
>35	Grandes islas

Tabla 4 Clasificación de los sistemas eléctricos insulares. Fuente: Elaboración propia a partir de [35].

Las redes eléctricas débiles pertenecientes a territorios insulares o islas presentan en su parque de generación un importante porcentaje de generación por fuentes renovables (solar, eólica, oceánica), debido a que estos territorios presentan condiciones de recurso renovable de gran potencial. El alto porcentaje de generación renovable, en relación con la generación convencional, hace que estos territorios sean más sensibles a inyecciones de potencia renovable u oscilante como es el caso de la energía undimotriz.

Estas potencias oscilantes unidas a las características propias de las redes eléctricas débiles pueden afectar al normal comportamiento de la red eléctrica afectando a su estabilidad.

La baja inercia, los bajos valores de característica de respuesta potencia/frecuencia, reservas primarias y secundarias menores, bajo nivel de mallado de la red o potencias de cortocircuito bajas son algunas de las características propias de este tipo de redes.

Dentro del estudio se plantea como uno de los factores determinantes que caracterizan el comportamiento de los sistemas eléctricos aislados su bajo valor de inercia que está ligado al número de grupos de generación convencional presentes en estos sistemas. Este bajo valor de la inercia afecta de manera directa a la estabilidad de la frecuencia, aumentando el número de excursiones en determinados eventos [35].

También la característica de la relación potencia/frecuencia es uno de los factores determinantes para la estabilidad en este tipo de sistemas. Este factor al igual que la inercia depende de los grupos de generación convencional y del llamado estatismo [36]



del sistema. Esta característica en los sistemas pequeños y aislados es pequeña si se compara con los sistemas eléctricos continentales. Para tener una idea, en el sistema gestionado por los operadores del sistema de transporte de la red europea (European Network of Transmission System Operators for Electricity (*ENTSO-E*)), la característica de respuesta potencia/frecuencia en esta red es de 12000 – 15000 MW/Hz [29], mientras que por ejemplo el valor de esta característica en el sistema eléctrico de Gran Canaria es de 50 MW/Hz. Los sistemas eléctricos pequeños y aislados exhiben mayores desviaciones cuasi-estacionarias de la frecuencia a causa de los valores bajos de esta característica.

Las redes de transporte y/o distribución en los sistemas eléctricos pequeños y aislados son generalmente poco malladas, presentándose en muchos de ellos topologías de red más parecidas a sistemas radiales. La relación resistencia/reactancia ( $R/X$ ) que presentan las redes es elevada. Esto causa caídas de tensión mayores tanto en el funcionamiento normal de los sistemas como ante contingencias. Además, durante un cortocircuito puede producirse aumentos de la potencia activa demanda en el sistema. Este aumento de la demanda causa caídas de la frecuencia durante el cortocircuito, al contrario que lo que cabría esperar en sistemas de mayor tamaño.

Teniendo en cuenta las características propias de las redes eléctricas débiles que presentan un mayor impacto a la estabilidad de la frecuencia descritas en este apartado a continuación, se resume la normativa de operación para la estabilidad de la frecuencia en los sistemas eléctricos débiles.

#### *2.2.3.1 Normativa de operación y regulación de la estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas débiles.*

Se ha podido concluir de lo descrito en el apartado relativo a la normativa de operación de la estabilidad de la frecuencia que para las redes continentales o interconectadas existen unos códigos de red bien definidos donde se determinan los requisitos técnicos que se deben cumplir para garantizar la estabilidad en redes eléctricas. En el caso de los sistemas eléctricos aislados o débiles en lo referente a normativa de operación o códigos de red encontramos que la literatura es bastante escasa. Se ha encontrado un estudio de revisión bibliográfica de los códigos de red para sistemas eléctricos aislados, “*State of the Art and Future Trends in Grid Codes Applicable to Isolated Electrical Systems*” [37], en donde se realiza un repaso a los aspectos más importantes a tener en cuenta en relación a la normativa de este tipo de redes.

Dentro del artículo se plantea que existen tres aspectos que determinan la necesidad de establecer códigos de red específicos para los sistemas eléctricos aislados: la gestión de las reservas de energía, el cumplimiento de los requisitos de seguridad y la estimación futura generación-demanda [37].



La ausencia de normativa de red más específica para los sistemas eléctricos débiles se debe a: la falta de regulaciones específicas en los sistemas eléctricos de pequeño tamaño y al pequeño número de fuentes de generación renovable instalada que no justifica la creación de una normativa que regule su integración [37]. Dentro del artículo especificado se describen tres ejemplos de marco regulatorio desarrollados en sistemas eléctricos medianos o pequeños. El primer estudio ha sido realizado en España para el caso de las Islas Canarias (territorio estudio en la presente tesis doctoral), en donde la isla más pequeña, la isla de El Hierro presenta una potencia instalada de tan solo 11,5 MW. El TSO de España, Red Eléctrica de España (*REE*) ha generado una serie de procedimientos específicos para las islas Canarias que incluyen perfiles de tensión diferentes del territorio peninsular u otros sistemas aislados españoles como las islas Baleares, Ceuta o Melilla [38]. El segundo ejemplo corresponde a Francia que tiene varias islas como son (St Pierre et Miquelon, Guadalupe, Martinica, Reunión y Córcega) con una capacidad instalada que varía entre 27MW y 435MW. Finalmente, el tercer estudio ha sido realizado para IEEE Std 1547 que se aplica a fuentes de generación distribuida de hasta 10MW conectadas a micro redes.

Al realizar el estudio se establecen diferencias por ejemplo entre los códigos de red franceses y los españoles. La legislación francesa establece que el TSO puede controlar la desconexión de las fuentes de generación renovable cuando alcanzan un nivel de penetración instantánea del 30% o más. Sin embargo, dentro de los códigos de red españoles no existe una limitación impuesta y la desconexión depende del código de red particular establecido para cada isla.

Se realizó dentro del estudio un análisis de los parámetros de estabilidad de la red para los sistemas eléctricos aislados. Para el caso de la estabilidad de la frecuencia, en la Figura 17 se muestran los requisitos de funcionamiento de la red para condiciones de frecuencia oscilantes en diferentes códigos de red [37]. Se observa que, en algunos casos, las oscilaciones de frecuencia que los sistemas aislados deben soportar de manera continua son importantes. Un ejemplo es el caso de la isla Sur de Nueva Zelanda, donde la frecuencia de estado estacionario puede oscilar hasta 8Hz con respecto a su valor nominal.

El requisito de que las fuentes de generación permanezcan conectadas bajo desviaciones de frecuencia no es común a todos los códigos de red. Por ejemplo, los grupos de generación eléctrica deben permanecer conectados a variaciones de hasta 0,37 Hz/s en Hawái, 0,75 Hz/s en Nueva Zelanda y hasta 1,3 Hz/s en Chipre.

Se realizó dentro del estudio una comparativa de estos valores con los sistemas eléctricos continentales de los países a donde pertenecían estos sistemas eléctricos aislados. La Figura 18 muestra los requisitos de frecuencia para estos sistemas continentales. Las bandas en los casos de sistemas interconectados son más estrictas que en el caso de los sistemas aislados. A diferencia de las bandas de 2 Hz-3 Hz en sistemas aislados, los sistemas interconectados sólo permiten una desviación de 1 Hz o 2 Hz.

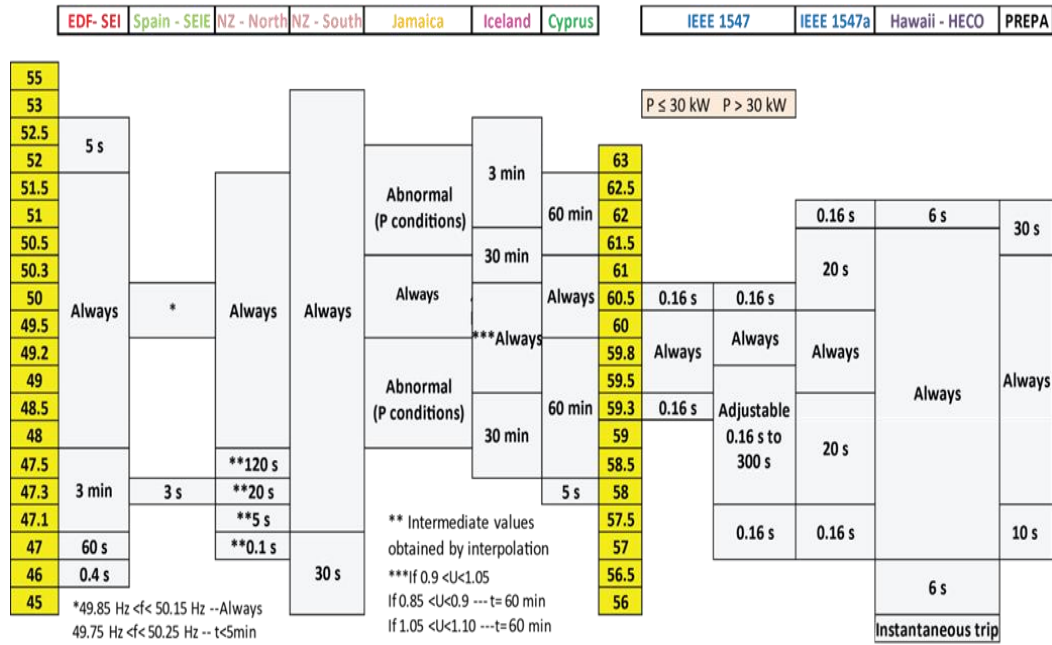


Figura 17. Requisitos de frecuencia en los principales sistemas eléctricos aislados [37].

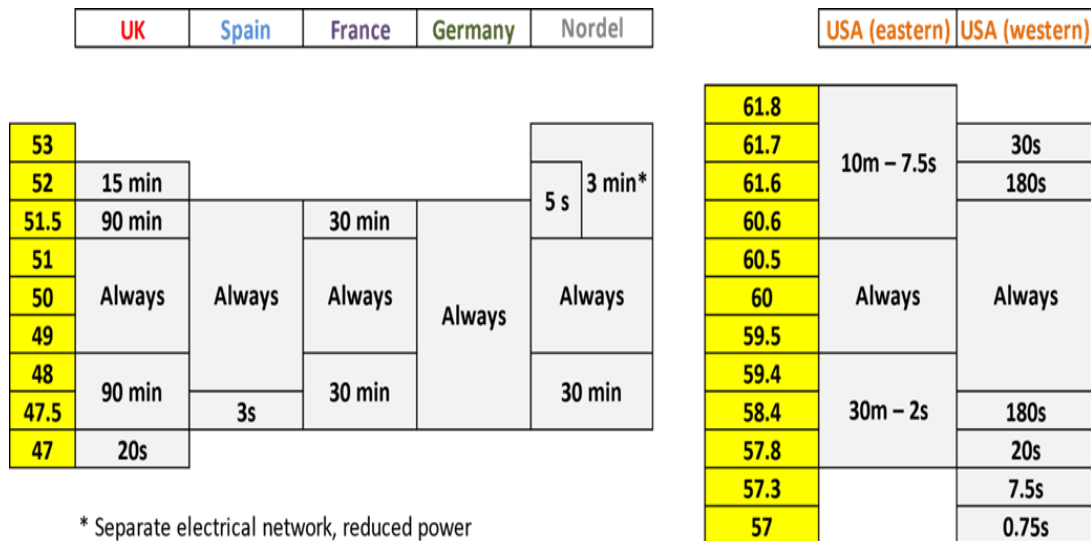


Figura 18. Requisitos de frecuencia para sistemas interconectados [37].

La perspectiva futura relativa a los códigos de red de los sistemas eléctricos aislados es positiva ya que dentro del *ENTSO-E* se ha creado un grupo específico para el estudio y creación de unos códigos de red comunes para los sistemas eléctricos aislados. El grupo denominado “*Regional Voluntary Group Isolated Systems (VRG IS)*”, está formado por cuatro de los *TSOs* europeos: *REE* (España), *Terna* (Italia), *Landsnet* (Islandia) y *Cyprus Transmission System Operator* (Chipre). Su misión será garantizar la correcta gestión y el funcionamiento de los sistemas de energía aislados y proporcionar experiencia para que el desarrollo y la actualización de los códigos de red tenga en cuenta las particularidades de los sistemas de energía aislados. Se espera que la experiencia proporcionada por el *VRG IS* se incluya en futuras publicaciones del código.

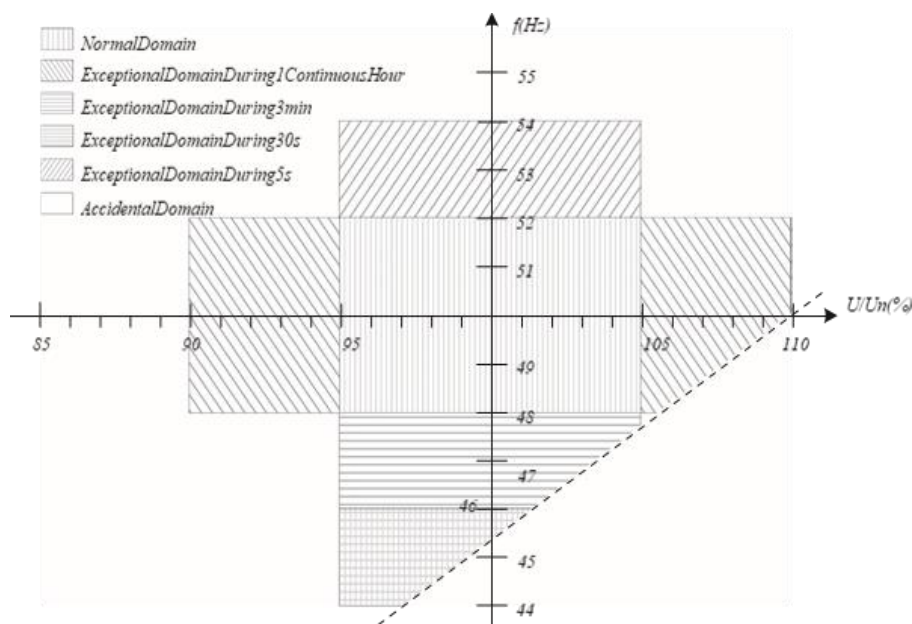


Figura 19. El área de operación de tensión y frecuencia para el código de red insular francesa resultado de los trabajos a través de las conclusiones sacadas del grupo del ENTOS-E VRG IS [39].

Dentro de este grupo de trabajo uno de los aspectos en los que se está trabajando en profundidad es en la creación de códigos de red específicos ante la integración de fuentes de generación renovable en estos territorios. En el caso de España, *REE* ha realizado una modificación de sus procedimientos de operación estableciendo unos “*Procedimientos de operación propios para los sistemas eléctricos insulares y extrapeninsulares (SEIE) P.O. 12.2*” [38]. La normativa española es una de las que más han avanzado en la adaptación de sus códigos de red desde que forma parte del *VRG IS*. Para el caso de la generación renovable *REE* establece como nuevos requisitos la emulación de la inercia y la capacidad para amortiguar las oscilaciones de frecuencia del sistema.

En el caso de la emulación de la inercia se propone el requerir que las fuentes de generación renovable, conectadas a través de un convertidor, emule la inercia proporcionada por la masa giratoria de los grupos convencionales. Las fuentes de generación renovable deberán poder aumentar o disminuir la potencia activa que inyectan en un punto de conexión común de acuerdo con las desviaciones de frecuencia.

En lo relativo a la capacidad de amortiguar las oscilaciones de frecuencia en el sistema, el sistema generador deberá ser capaz de proporcionar potencia activa que pueda compensar las oscilaciones de baja frecuencia en el sistema. Como solución se plantean los sistemas de almacenamiento de energía rápido, ya que proporcionarían una reserva primaria y colaborarían en la regulación a corto plazo.

Además de estos dos requisitos *REE* también ha planteado en versiones iniciales de su código la conveniencia del uso de sistemas de control como medida durante las perturbaciones.

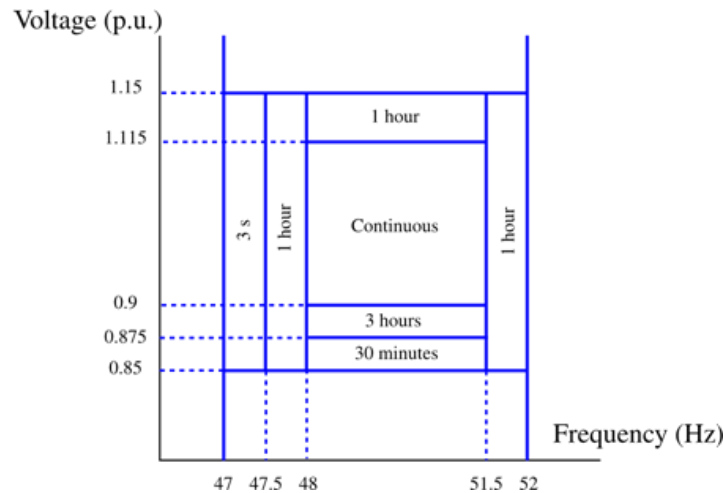


Figura 20. Rangos de operación REE para los SEIE España [38] [27].

Otro factor dentro de la normativa de operación a considerar son los valores establecidos para *ROCOF* para redes eléctricas débiles. Partiendo de la normativa establecida para el *ROCOF* por el *ENTSO-E* explicada en apartados anteriores se han realizado los cálculos y consideraciones oportunas para establecer los valores máximos y mínimos del *ROCOF* para los sistemas eléctricos aislados. En la Tabla 5 se resumen los valores establecidos para el *ROCOF*, independientemente de si la generación es convencional o renovable en algunos sistemas eléctricos aislados que han sido objeto de estudio.

<i>Región</i>	<i>ROCOF (Hz/s)</i>
Irlanda	$\pm 0.5 \text{ Hz/s}$
Norte de Irlanda	$\pm 0.5 \text{ Hz/s}$
España SEIE	$\pm 2 \text{ Hz/s}$
Tasmania	$\pm 4 \text{ Hz/s}$

Tabla 5. Valores *ROCOF* para sistemas eléctricos aislados [27].

Conocida la normativa para redes eléctricas débiles en donde se exponen los valores límite y procedimientos a considerar para garantizar la estabilidad de la frecuencia otro aspecto importante objeto de estudio es el control de la frecuencia para que ésta permanezca dentro de los valores establecidos en los códigos de red descritos anteriormente. En el apartado dedicado a la regulación de la frecuencia en redes eléctricas se han descrito los procedimientos de operación y en concreto la regulación primaria, secundaria y terciaria de manera general para todo tipo de redes, pero para el caso de las redes eléctricas débiles estos procedimientos presentan cierta problemática debido a las características propias de este tipo de redes eléctricas y por eso han sido objeto de estudio [27] [39]. A

continuación, se resumen algunos de los aspectos más relevantes resultado de estos estudios relacionados con el control de la frecuencia en redes eléctricas débiles.

En el caso del control de la frecuencia en redes eléctricas débiles los *TSOs* a menudo especifican procedimientos de desprendimiento de carga de subfrecuencia y subtensión (*UFLS* y *UVLS* respectivamente). Además, se suele solicitar a la generación no sincrónica que contribuya al control activo de potencia y frecuencia de forma análoga a la generación sincrónica.

En la Figura 21 se observa claramente que los procedimientos de operación establecidos por los *TSOs* de Francia y Reino Unido para la regulación de la frecuencia, así como los tiempos de respuesta ante las perturbaciones.

En el caso de las islas británicas (Figura 21 A) la reserva primaria se activa con un retraso de respuesta de aproximadamente 2 s después del evento de pérdida de generación y se libera por completo en 10 s. La respuesta de frecuencia secundaria sigue la escala de tiempo de respuesta primaria. Esta reserva debe mantenerse hasta 30 min. Para cuantificar el requisito de respuesta de frecuencia futura con alta, media y baja penetración energías renovables en la red, estudios recientes del *TSO* británico sugieren que se debe adoptar un esquema de respuesta de frecuencia rápida en detrimento de los servicios de inercia sintética para minimizar el riesgo de reducciones de potencia adicionales con energías renovables en el período de recuperación. Para que sea efectivo, el control primario debe habilitarse en menos de 1 s de un cambio de frecuencia de 0,5 Hz y liberarse a la red en los próximos 5 s, permitiendo que la respuesta de frecuencia se reduzca significativamente. Cambio de frecuencia de 0.5 Hz y liberado a la red en los próximos 5 s, permitiendo que la respuesta de frecuencia se reduzca significativamente.

En la Figura 21 B se presenta el requisito de respuesta de frecuencia aplicado a las redes aisladas francesas. El código de red francés requiere la activación del control de frecuencia inmediatamente después de que el efecto ocurra. Al ser un sistema insular de gran tamaño el control secundario es inexistente. Como puede verse, la regulación de frecuencia es ejecutada por la reserva de control primario que se habilita dentro de un marco de tiempo de 10 s. La contribución de reserva primaria debe durar hasta 15 min. El requisito de frecuencia actual presentado solo es obligatorio con respecto a los generadores convencionales (trazo de frecuencia después de una pérdida de alimentación en el trazo verde oscuro). Por otro lado, las islas francesas han estado recibiendo una creciente penetración de energía eólica y solar. Por lo tanto, su impacto en el control de frecuencia se está convirtiendo en una preocupación real y existe un límite máximo de penetración de producción de energías renovables [52].

De estos dos ejemplos de regulación de la frecuencia en redes eléctricas insulares se puede concluir claramente que los requisitos para este tipo de redes eléctricas son más restrictivos que para las continentales y que la integración en ellas de energías renovables en estos sistemas debe analizarse con detenimiento.

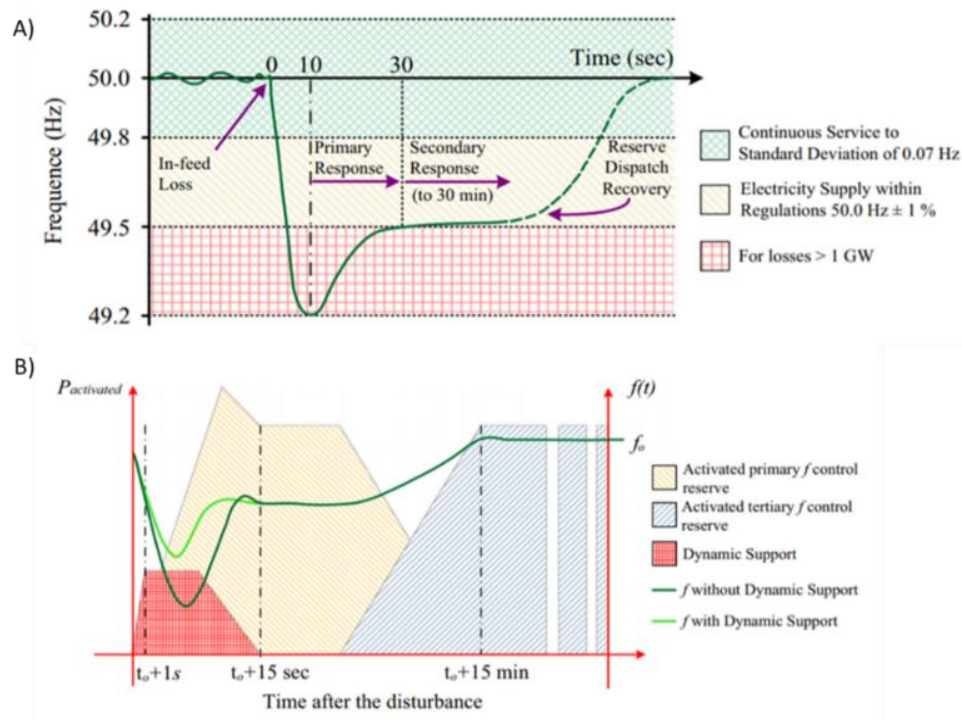


Figura 21. Regulación de la frecuencia para los casos A) islas británicas y B) islas francesas [39].

## 2.3 Mecanismos para contribuir a la estabilidad de la frecuencia.

### 2.3.1 Introducción.

Como se ha resumido en el apartado anterior dedicado a la estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas, y en especial en redes eléctricas débiles, la integración de potencia procedente de generación renovable puede causar desequilibrios en los parámetros que definen la estabilidad de los sistemas eléctricos. Como solución a esta problemática existen estrategias de control y regulación realizadas por el operador del sistema para contribuir a la estabilidad de la frecuencia y garantizar la calidad en el suministro de la energía dentro los valores establecido como se ha resumido anteriormente. Pero, ¿qué mecanismos o estrategias se pueden implementar desde el lado del parque de generación para mejorar la calidad de la señal que es entregada por el parque de generación renovable a la red eléctrica?

La estrategia más conveniente en el ámbito de la integración de las energías renovables en sistemas eléctricos de potencia es el **alisado de la potencia (power smoothing)** de generación del parque renovable. El alisado de potencia consiste en la aplicación de soluciones que den como resultado una señal de potencia de generación del parque renovable de característica suavizada eliminando en la medida de lo posible eventos de

generación pronunciados o atípicos como por ejemplo los picos de generación debido a un aumento repentino del recurso renovable.

En el caso de la energía undimotriz, energía renovable tratada en la presente tesis doctoral, el alisado de la potencia del parque de generación se puede conseguir aplicando los siguientes mecanismos [40]:

- **Desarrollo de estrategias específicas de control.** El hecho de que los sistemas de generación están conectados a la red mediante convertidores electrónicos de potencia permite implementar estrategias de control destinadas a que la consigna de generación siga el requisito de mínimo efecto sobre la red en vez de máxima producción de potencia.
- **Optimización de las características diseño parque de generación.** Este mecanismo consiste en actuar sobre las variables asociadas a los elementos que forman el parque de generación, desde los parámetros de diseño de captación de energía del oleaje a la distribución de los captadores en el mar (forma del mallado, ángulo respecto al frente de ola). Como herramienta matemática para el estudio de la optimización de parámetros se suelen utilizar algoritmos evolutivos multiobjetivo.
- **Integración de sistemas de almacenamiento energético.** Este mecanismo se traduce en calcular un cierto nivel de potencia de parque undimotriz a almacenar la cual se reservará para su volcado a red cuando las condiciones de operación lo requieran o sean las adecuadas en términos de estabilidad de la red eléctrica. Al almacenar una parte de la potencia generada por el parque undimotriz se entregará a la red eléctrica una característica de potencia de parque modificada (alisada o suavizada) con un comportamiento más estable la cual contribuirá a la disminución de eventos fuera del estado normal de operación en el sistema eléctrico. Este mecanismo también contribuirá a un aprovechamiento más adecuado de la potencia generada por el parque undimotriz ya que toda la energía producida por él será volcada a la red en algún momento.

Durante el trabajo de investigación realizado para la presente tesis doctoral se han tenido en cuenta los mecanismos descritos anteriormente (ver apartado contribuciones de la tesis doctoral) profundizando en la integración de sistemas de almacenamiento energético como mecanismo para el alisado de la potencia (Capítulo 7).

En el presente apartado se exponen los principales conceptos teóricos de los sistemas de almacenamiento a nivel general y en específico como mecanismos para contribuir a la estabilidad en redes eléctricas entre los cuales se encuentra el alisado de la potencia que han sido aplicados en la presente tesis doctoral.



### 2.3.2 Sistemas de almacenamiento energético como mecanismos para el alisado de la potencia.

En el presente apartado se analizará la aplicación de los sistemas de almacenamiento energético (“*Energy Storage Systems (ESS)*”) para aumentar la integración de energías renovables en los SEP. Se describirán brevemente las distintas aplicaciones de los ESS entre las que se encuentra el mecanismo de alisado de la potencia, también llamado “*Power Smoothing*”, de aplicación en la presente tesis doctoral.

#### 2.3.2.1 Concepto y clasificación.

Los sistemas de almacenamiento energético o “*Energy Storage Systems (ESS)*”, se definen como el conjunto de tecnologías que se utilizan para conservar o almacenar la energía de diferentes formas, para después poder liberarla y poder ser usada cuando sea necesaria.

Por lo tanto, un ESS es en realidad un intercambiador de energía según un ciclo de carga y descarga. La presencia de estas tecnologías modifica las ecuaciones básicas de la producción de energía de la siguiente manera:

$$\text{Sin ESS.} \quad P_{\text{PRODUCIDA}} = P_{\text{CONSUMIDA}}; \quad E_{\text{PRODUCIDA}} = E_{\text{CONSUMIDA}}$$

$$\text{Con ESS.} \quad P_{\text{PRODUCIDA}} = P_{\text{CONSUMIDA}} \pm P_{\text{ALMACENADA}}; \quad E_{\text{PRODUCIDA}} = E_{\text{CONSUMIDA}} \pm E_{\text{ALMACENADA}}$$

En la Tabla 6 se resumen los conceptos principales a tener en cuenta a la hora del estudio de los ESS.

<i>Concepto</i>	<i>Definición</i>
Capacidad de almacenamiento	Cantidad de energía almacenada (kWh o MWh)
Duración de la descarga	segundos, minutos, horas
Potencia específica	kW, MW
Tiempo de respuesta	De milisegundos a minutos
Frecuencia de la descarga	Número por unidad de tiempo, como: por día o por año
Eficiencia del ciclado	Energía descarga/energía carga
Vida útil	En ciclos y/o años
Densidad de energía	Capacidad de almacenamiento de energía total/volumen o peso, especialmente interesante en el caso de aplicaciones móviles.
Auto descarga	% por día o por mes
Coste	€/kWh, €/kW

Tabla 6. Conceptos principales para los ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].



En la Figura 22 se resume la clasificación que se ha establecido para los ESS.

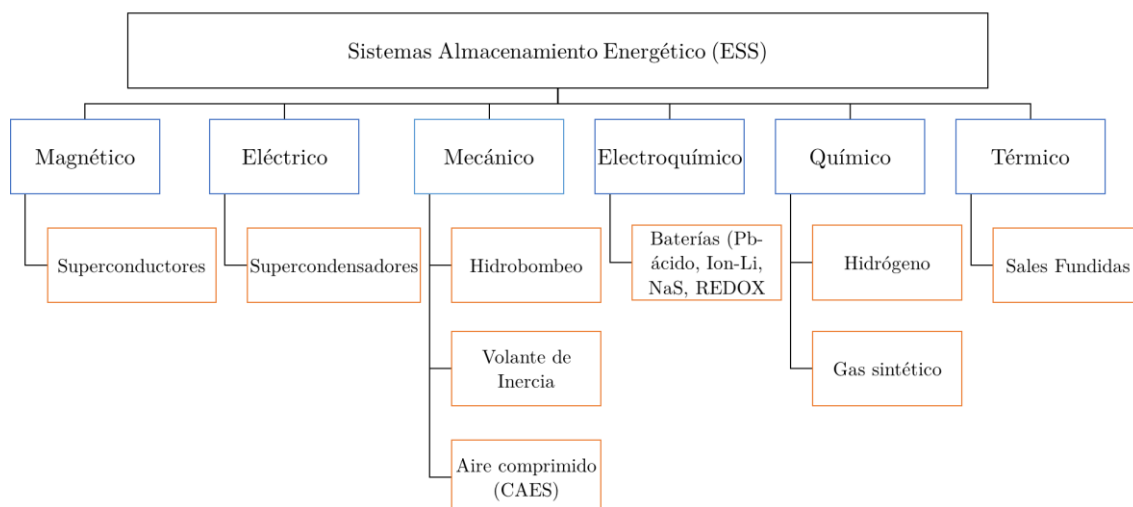


Figura 22. Clasificación de los ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].

En los siguientes apartados se profundizará en la situación actual de las tecnologías de ESS, así como en sus aplicaciones, profundizando los conceptos relativos a su aplicación eléctrica como mecanismos para contribuir a la estabilidad de las redes eléctricas.

### 2.3.2.2 Situación actual de los ESS.

Los sistemas de almacenamiento energético almacenamiento (“*Energy Storage Systems (ESS)*”), se convertirán en las tecnologías facilitadoras claves dentro de los modelos de transición energética. El objetivo planteado es el conseguir una capacidad de energía de almacenamiento de electricidad en más de 1000 GW para 2030 para aumentar la integración de las energías renovables en los sistemas eléctricos y contribuir al desarrollo de la movilidad sostenible entre otras aplicaciones.

Ha sido históricamente costoso y difícil de almacenar por largos períodos, de ahí la necesidad de equilibrar la generación y demanda de electricidad en tiempo real. El almacenamiento hidroeléctrico bombeado es la principal excepción a la dificultad y el gasto de almacenar electricidad, y representa la mayor fuente de almacenamiento de electricidad de hoy en día con alrededor de 169 GW de energía, lo que representa el 96% de los aproximadamente 176 GW de almacenamiento total de energía, seguido de almacenamiento térmico con 3,3 GW (1,9%), baterías electroquímicas con 1.9 GW (1.1%) y almacenamiento electromecánico con 1.1 GW (0.9%) (Figura 23) [40].

Más de las tres cuartas partes de todo el almacenamiento de energía se instaló en solo 10 países, mientras que solo 3 países (China (32.1 GW), Japón (28.5 GW) y Estados Unidos (24.2 GW) representaron casi la mitad (48%) de la energía global de la capacidad de almacenamiento instalada [40].

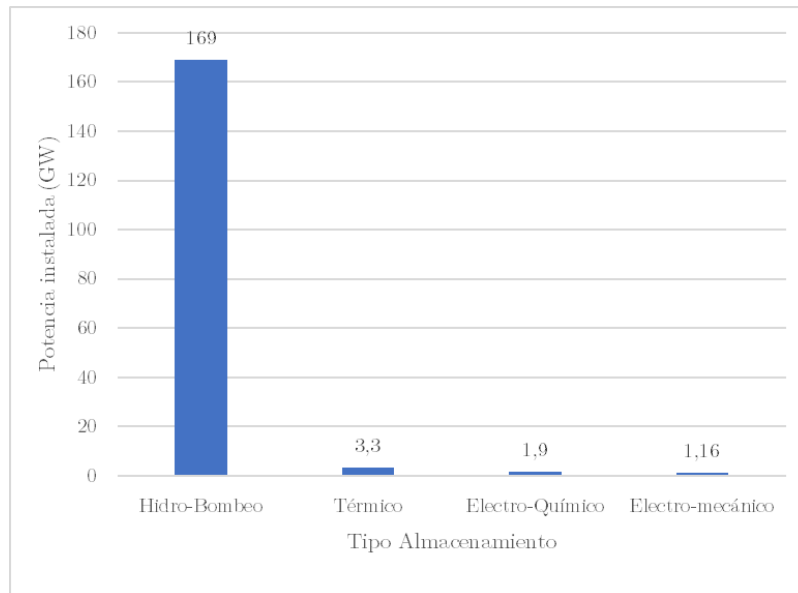


Figura 23. GW instalados en 2017 según tipo de ESS. Fuente: elaboración propia a partir de [40].

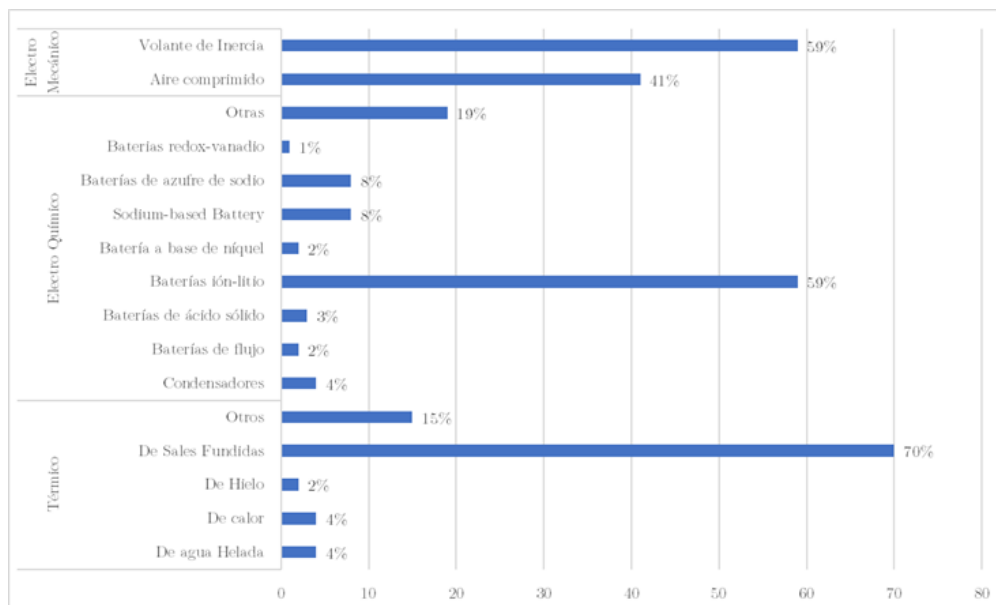


Figura 24. Capacidad de energía de almacenamiento de energía térmica, electroquímica y electromecánica por tecnología EN 2017. Fuente: elaboración propia a partir de [40].

Las tecnologías de almacenamiento de energía térmica, electroquímica y electromecánica aportan un total de 6,8 GW de almacenamiento de energía a nivel mundial. Las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica actualmente se concentran en la energía solar de concentración, lo que les permite almacenar energía, a fin de proporcionar la flexibilidad para enviar electricidad fuera de las horas pico de sol a la noche o las 24 horas. La tecnología de sales fundidas es la solución comercial dominante actualmente implementada y representa tres cuartos del almacenamiento de energía térmica implementado a nivel mundial utilizado para aplicaciones de electricidad. En el caso del almacenamiento mecánico, aparte del hidrobombeo, existe una potencia instalada total de volantes de inercia de 0.9 GW y un despliegue total de almacenamiento de energía por aire comprimido que ha alcanzado 0.6 GW de potencia [40].

El almacenamiento electroquímico es uno de los segmentos de mercado de más rápido crecimiento, aunque la capacidad operativa de almacenamiento de la batería instalada todavía es de solo 1.9 GW. Aunque hay una serie de tecnologías emergentes con un gran potencial para un mayor desarrollo, las baterías de iones de litio representan la mayor parte (59%) de la capacidad operativa instalada a mediados de 2017, sin duda potenciada por el desarrollo del vehículo eléctrico. Sin embargo, hay contribuciones pequeñas pero importantes de las baterías, condensadores y baterías de flujo de azufre sódico de alta temperatura. Durante los últimos 20 años, las instalaciones globales de despliegue de almacenamiento electroquímico crecieron exponencialmente a medida que disminuyeron rápidamente los costos y las mejoras de rendimiento [40].

En los próximos años la industria del almacenamiento de energía de los países considerados líderes a nivel mundial se ampliará siguiendo el patrón de rápido crecimiento que es evidente en las tecnologías de almacenamiento de aplicación en el servicio de apoyo a las energías renovables. Mejoras incrementales en tecnologías de almacenamiento de energía, desarrollos en la regulación regional y los impulsores del mercado, y los modelos de negocio emergentes serán claves para esa expansión y harán del almacenamiento de energía una parte creciente y viable de la red eléctrica. En el sector estacionario, se esperan mayores aplicaciones económicas debido a la disminución de los costos de los servicios de la red, así como a una creciente penetración de electricidad renovable en las islas / mini redes [40].

### 2.3.2.3 Aplicaciones de los ESS.

Las aplicaciones principales para ESS en relación con las redes eléctricas son:

- **Estabilidad de la generación (Capacity firming) –36.8%–:** Consiste en mantener en un valor de consigna durante un tiempo la potencia intermitente

entregada a la red por parte de un sistema de generación renovable, con el objetivo de evitar desviaciones bruscas en la potencia y tensión en la red.

- **Regulación de frecuencia (Frequency regulation)-13.2%-:** Consiste en consumir o entregar potencia para que la frecuencia de la red esté dentro de los límites establecidos.
- **Desplazamiento de la curva de demanda (Time shifting) -8.4%-:** Consiste en mover cantidades importantes de energía, normalmente generadas por renovables, a momentos donde la demanda es mayor y no existe posibilidad de generación.

Las **aplicaciones específicas en relación con energías renovables** representan casi la mitad (49%) de todas las aplicaciones, lo que indica claramente el importante papel que desempeña el almacenamiento para potenciar el aumento de la potencia instalada de energías renovables.

Además, se puede hablar de otras aplicaciones también relacionadas con la red como son:

- **Equilibrado de la carga (Load levelling).** Consiste en almacenar energía en periodos de alta generación y baja carga y liberarla en momentos en que la demanda es mayor, desde un punto de vista de balance generación-demanda y mercado eléctrico.
- **Reducción de picos de potencia (Peak saving).** Consiste en reducir los picos de potencia en la demanda, con objeto de reducir el término de potencia de la factura o la potencia instalada.
- **Calidad de la potencia (Power quality).** Consiste en mejorar las condiciones de la potencia suministrada en cuanto a contenido armónico y estabilidad de tensión.
- **Reserva rodante (spinning reserve).** Permite dar respuesta al sistema eléctrico tras un corte completo en un sistema de generación o de transmisión.

Por último, otras aplicaciones menos usuales, pero en crecimiento, en particular para sistemas de almacenamiento de baterías, incluyen propietarios de plantas de energía fotovoltaica residenciales y comerciales, especialmente aquellos en países pioneros como Australia y Alemania (es decir, en su intento de aumentar su autoconsumo). Estas aplicaciones son un mercado en crecimiento y también se utilizan en islas y microrredes, sistemas solares domésticos, electrificación fuera de la red y vehículos eléctricos.

Además del desplazamiento en la curva de la demanda, los ESS proporcionan niveles significativos de calidad de la potencia para contribuir a la estabilidad en la generación (6,9 GW), capacidad de arranque en ausencia de suministro (5,9 GW), aplicaciones en relación con las energías renovables (3,2 GW) y reserva rodante (2 GW). Estos cuatro casos de uso representan el 11% restante de las aplicaciones globales de casos de uso principales de ESS. En España la aplicación principal es el desplazamiento en la curva

de la demanda, aunque existe una importante aplicación en relación con la generación renovable en concreto para la contribuir en la estabilidad de la generación de energía eólica y solar fotovoltaica, aproximadamente una cuarta parte de 8 GW de ESS principalmente hidro-bombeo. Japón también dedica un porcentaje significativo de hidro-bombeo a aplicaciones de carácter general, incluyendo 2.8 GW (10%) a servicios de arranque en ausencia de suministro y 2 GW (7%) a equilibrado de la carga. Austria tiene el caso de uso más diverso para PHS en su sistema, con un 54% de su total de 4.7 GW destinados al desplazamiento de la curva de la demanda, 17% para proporcionar estabilidad en la generación, 16% para proporcionar servicios de arranque desde ausencia de suministro y 13% para contribuir en la estabilidad de la generación de energía renovables.

A pesar de sus niveles de despliegue mucho más bajos, los servicios principales proporcionados por los ESS electroquímicos, electromecánicos y térmicos son más diversos que los de las plantas de hidro-bombeo. Esto es particularmente cierto para los sistemas baterías, donde la capacidad de los cinco casos principales de uso principal asciende al 80%, aún menos que la proporción de desplazamiento de la curva de la demanda para hidro-bombeo.

Los siguientes casos de uso principal más importantes son la reserva rodante (9%), la gestión de la factura eléctrica (8%), el desplazamiento de la curva de la demanda (8%) y la contribución a la estabilidad de la generación de energías renovables (5%). Alrededor del 4% del caso de uso principal de la capacidad de energía de los sistemas BES es la provisión de estabilidad en la generación, el 3% para el desplazamiento de la curva de demanda y el 2% cada uno para los servicios de arranque desde ausencia de suministro (black start), resiliencia y transporte a la red.

Alrededor del 55% del caso de uso principal de la capacidad de potencia ESS electromecánica del mundo es para energía in situ, mientras que el 20% se dedica a servicios de arranque negro el 13% a proporcionar capacidad de suministro firme, 7% a cambio de tiempo de electricidad y 3% a regulación de frecuencia. El despliegue de almacenamiento de energía térmica en el mundo está dominado actualmente por el almacenamiento de sales fundidas un 72% de la capacidad cuyo uso principal se clasifica como reafirmante de capacidad renovable. Sin embargo, esto está abierto a debate, ya que también podría clasificarse como cambio de horario de electricidad.

Por lo tanto, se puede concluir que las principales aplicaciones de los ESS se centran en contribuir a la mejora de la gestión de la energía y la potenciación de la integración de las energías renovables en los sistemas eléctricos.

### 2.3.2.3.1 Aplicaciones de los ESS para contribuir a la estabilidad de los SEP.

En el presente apartado tiene como objetivo profundizar en los conceptos que den la visión de los ESS dentro de su aplicación como mecanismos para contribuir a la estabilidad de los SEP, concepto que será de aplicación dentro de la presente tesis doctoral (Capítulo 7). Los ESS aplicados dentro del ámbito de la estabilidad de los SEP son clasificados según actúen en términos de potencia o energía y a su vez actúan en las diferentes partes (generación, transporte y distribución y consumo). En Figura 25 se resumen las principales aplicaciones de los ESS clasificados en potencia o energía y según en la parte del mecanismo del SEP que se encuentre.

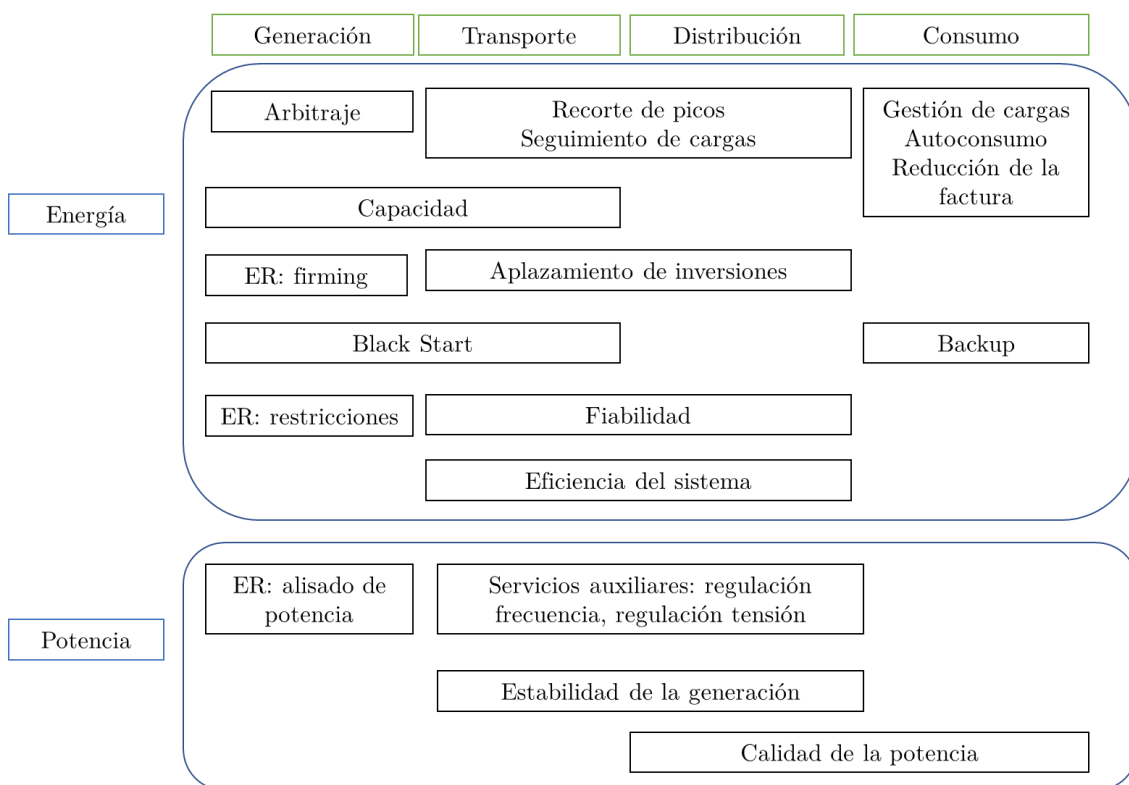


Figura 25. Aplicaciones de los ESS para contribuir a la estabilidad de los SEP. Fuente: elaboración propia a partir de [40].

Como se observa en la Figura 25 dentro de las aplicaciones de potencia se encuentra el alisado de la potencia (power smoothing) que formaría parte de la aplicación de estabilidad de red relacionada con generación. Como su nombre indica, suaviza el perfil de la potencia generada por centrales de energías renovables. Este alisado de la potencia se puede hacer de dos formas: eliminando los picos de potencia generada (Figura 26 A) o amortiguando) las fluctuaciones momentáneas de la potencia (Figura 26 B). El resultado final, tras la aplicación de esta técnica, es un perfil de potencia con menos

perturbaciones, donde las pendientes de potencia se han alisado. Esta aplicación es uno de los servicios complementarios donde el uso de los ESS resulta más destacable. Se trata de una medida preventiva de regulación del desequilibrio de potencia. Este concepto será aplicado en el Capítulo 7 de la presente tesis doctoral.

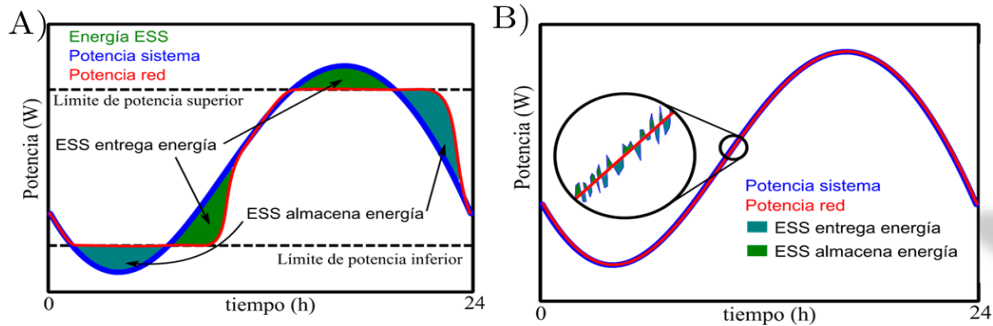


Figura 26. Aplicación de los ESS como mecanismos de alisado de potencia (power smoothing): A) eliminación picos potencia, B) amortiguación fluctuaciones potencia.

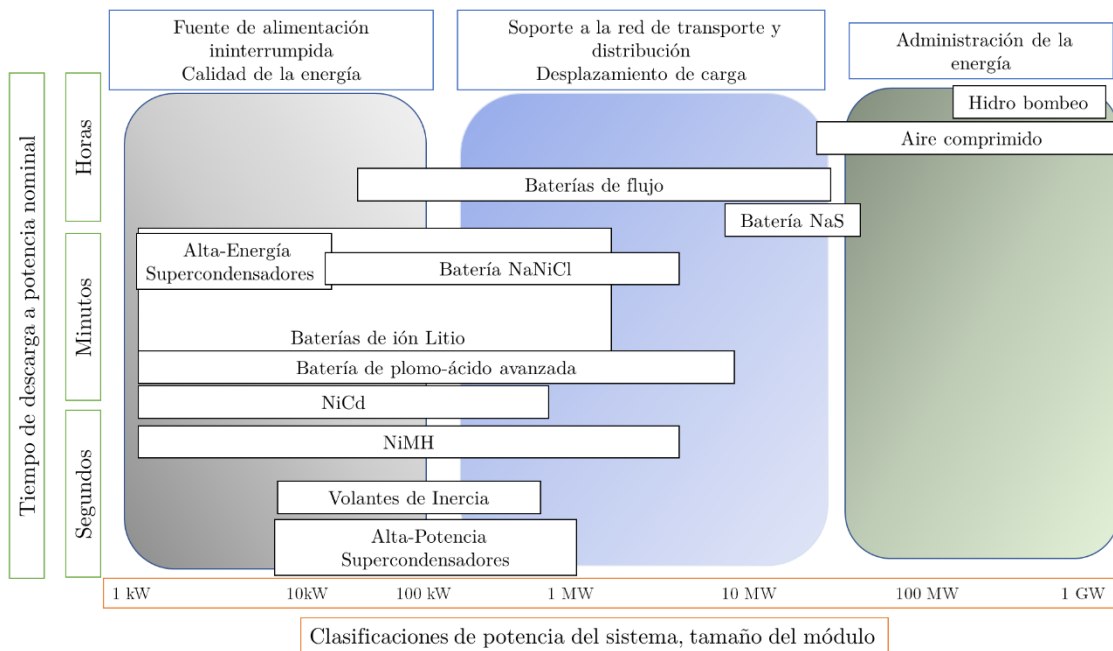


Figura 27. Clasificación tecnologías de almacenamiento por rango de capacidad y tiempo de carga/descarga.

El siguiente paso sería determinar qué tecnología de almacenamiento energético es la más adecuada para su aplicación como mecanismo de alisado de la potencia. Como se ha resumido en el apartado dedicado al concepto y clasificación de los ESS, no todas las tecnologías tienen un mismo comportamiento de carga/descarga ni tienen el mismo factor de capacidad. En la Figura 27 se resumen las principales tecnologías de ESS en uso en

función de su aplicación en los SEP junto con su rango de capacidad y tiempo de carga/descarga.

Las tecnologías que presentan un mejor comportamiento para su integración como mecanismo para el alisado de potencia serán aquellas que están en la franja temporal de carga/descarga de segundos, en la zona de calidad de la energía. Por lo tanto, según lo resumido en la Figura 27, los sistemas de almacenamiento rápido como los volantes de inercia o los supercondensadores serán las tecnologías que a priori pueden resultar más convenientes para esta aplicación, aunque dependiendo del caso algunos tipos de baterías también podrían ser adecuadas.



---

## Capítulo 3

---

### 3 Revisión del Estado del Arte.

En el presente capítulo se ha realizado una visión global sobre los trabajos de investigación relacionados con el tema estudio de la presente tesis doctoral. Esta revisión bibliográfica se ha realizado en tres bloques diferenciados. El primero dedicado a la integración de energía undimotriz en redes eléctricas y en especial en redes eléctricas débiles o territorios insulares. El segundo bloque dedicado a los estudios de estabilidad de la red eléctrica ante la integración de energía undimotriz y en especial en redes eléctricas débiles. El tercer bloque dedicado a los estudios en donde se han aplicado mecanismos o estrategias para alisar la señal del parque de generación undimotriz contribuyendo a mitigar los efectos en la estabilidad de la red eléctrica ante la integración de energía undimotriz, en especial en redes eléctricas débiles. Dada la interconexión entre los tres bloques parte de la literatura descrita en el presente estado del arte no pertenece a un único bloque.

El objetivo de esta revisión es la de dar a conocer el estado actual de la técnica para identificar las potenciales contribuciones resultado del trabajo investigador desarrollado en la presente tesis doctoral.

La revisión de la literatura que se presenta se ha realizado haciendo uso del portal FARO, habilitado para su uso por la comunidad científica por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

#### 3.1.1 Estudios de integración de la energía undimotriz en redes eléctricas.

La revisión bibliográfica de los estudios que se han realizado acerca de la integración de la energía undimotriz en redes eléctricas se ha dividido a su vez en varios bloques de conocimiento: el recurso del oleaje, las tecnologías de captación, los parques de generación y finalmente la integración en red de dichos parques. Se ha realizado una revisión bibliográfica teniendo cuenta todos estos bloques dando una visión global del recorrido investigador en el campo de la energía undimotriz porque como se verá en futuros apartados de la presente tesis doctoral estos estudios se deben de tener en cuenta como paso previo para los estudios de estabilidad de red y los estudios de alisado de la señal.

Como ha ocurrido con el desarrollo de otros recursos renovables los primeros estudios e investigaciones sobre la energía undimotriz se centraron en la evaluación de la ola como recurso energético. Así encontramos diversos estudios cuyo objetivo fue la cuantificación

del potencial energético de las olas a nivel mundial, dando como resultado  $2.11 \pm 0.05$  TW con cantidades iguales en el hemisferios norte y sur [41], confirmando el potencial energético de las olas para su uso como fuente de generación renovable.

Esa evidencia dio lugar a numerosos estudios de caracterización del oleaje en localizaciones concretas [42] [43] [44] [45] [46]. Para la realización de las modelizaciones del recurso del oleaje se hizo uso de bases de datos de oleaje a nivel mundial [47] [48] así como de herramientas computacionales como son el SWAN [49] o el Delft3D Flexible Mesh Suite [50]. Como resultado de esas modelizaciones numéricas se han podido determinar los valores medios, puntos óptimos y críticos del recurso del oleaje a nivel mundial dando a conocer las localizaciones óptimas a nivel recurso del oleaje para la integración de tecnologías de captación.

Como ejemplo resultado de este tipo de estudios encontramos el realizado para el llamado Espacio Atlántico Europeo [51] por medio del SWAN y validado con datos de boyas de oleaje real, en donde se resumen las características más significativas relativas al recurso del oleaje para las áreas de: costa oeste de Irlanda, costa suroeste de Reino Unido, costa oeste de Francia, norte de España e Islas Canarias y la costa continental de Portugal e islas Azores y Madeira.

Como territorios singulares a tratar en los estudios de caracterización del oleaje aparecen los territorios insulares o islas. Así encontramos los estudios donde se evalúa el recurso del oleaje en las islas Fiji [52], Hawaii [53], Cabo Verde [54] o las islas pertenecientes al espacio denominado la Macaronesia: Madeira [55], islas Canarias [56] [57] y Azores [58].

Aunque estos estudios cuantifican el recurso como moderado con un valor promedio de 25 kW/m en la mayoría de los territorios analizados, estos territorios insulares presentan otras características como son la viabilidad a la hora de la integración de las tecnologías de captación o el entorno de operación en mar convirtiéndolos en territorios a considerar a la hora del desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo de la integración de tecnologías de energía undimotriz.

En el caso del archipiélago de las islas Canarias, al que pertenece la isla de Tenerife (territorio insular que ha sido utilizado como localización dentro la presente tesis doctoral), los resultados obtenidos de los estudios de caracterización del oleaje han determinado que existen diferencias en el recurso dependiendo el período estacional y se han determinado como zonas donde el existe un mayor potencial energético la costa norte de Lanzarote, la zona oeste de Lanzarote y Fuerteventura, norte y noroeste en La Palma y El Hierro, así como la costa norte de Tenerife. Siendo el potencial medio 21-24 kW/m en estas zonas, siendo un poco más reducido en el caso del norte de Gran Canaria y La Gomera [56].

Si se profundiza en los estudios realizados para la isla de Tenerife, territorio que se ha seleccionado para el estudio de estabilidad de la presente tesis doctoral, se encuentra un

estudio en dónde no sólo se cuantifica el recurso del oleaje en diferentes zonas de la isla de Tenerife sino que también se realiza dentro del estudio un estudio de viabilidad zonal en donde se determina que zona es la más adecuada para la explotación de un parque de generación undimotriz teniendo en cuenta factores como batimetría, la distancia a la costa o un puerto cercano y la zonificación en alta mar. Como resultado se establece la zona norte de la isla donde el potencial energético ronda los 21kW/m con estado de mar de olas de entre 1,5m y 3m de altura significativa de ola ( $H_s$ ) y períodos pico entre 10s y 14s [59].

El siguiente escalón a nivel investigador fue la evaluación de la viabilidad de la integración de tecnologías de generación undimotriz o en sus siglas en inglés *Wave Energy Converters* (WECs), en los espacios donde se había determinado un recurso óptimo, para su aprovechamiento. La amplia variedad de soluciones tecnológicas existentes derivó en la realización de numerosos estudios cuyo objetivo fue la determinación de la potencia extraída por las diferentes tecnologías, la búsqueda acciones que la maximizaran y las estrategias de control para funcionamiento óptimo.

Dentro de las numerosas soluciones tecnológicas se encuentra el absorbedor puntual, se ha centrado la revisión bibliográfica en esta tecnología, que se ha seleccionado como tecnología de estudio a integrar dentro de la presente tesis doctoral. Diversos estudios en relación con los absorbedores puntuales plantean esta tecnología como una de las candidatas a tener éxito en su desarrollo tecnológico [60] debido a que en comparación con otros WECs los absorbedores puntuales cuyo cuerpo principal se puede fijar en una plataforma, presentan un ahorro significativo en lo relativo a los costes de instalación y fabricación [61] [62].

Muchos investigadores se han centrado en la modelización del absorbedor puntual. Para modelizar los absorbedores puntuales se han utilizado diferentes métodos como por ejemplo métodos analíticos, *Boundary Integral Equation Method* (BIEM) o métodos aplicando las ecuaciones de *Navier-Stokes* (NSEM). Los métodos BIEM y NSEM son los más utilizados para modelar desde un punto de vista práctico en el dominio de la frecuencia un absorbedor puntual [63].

Destaca dentro de los estudios realizados para los absorbedores puntuales es el realizado sobre el estado actual de la tecnología [60]. En este estudio en donde se han tenido en cuenta estudios precedentes y optimizaciones realizadas a la tecnología se presenta una revisión extensa tanto de su desarrollo teórico como experimental. El documento se centra en tres bloques de estudio: el absorbedor puntual de un cuerpo, de dos cuerpos y los PTOs. Este estudio es de gran valía ya que expone los trabajos que se están realizando para que este tipo de WECs continúen avanzando en los niveles de madurez establecidos para las tecnologías oceánicas, en sus siglas en inglés las *Technology readiness levels* (TRL) [64]. Como conclusiones en este estudio se determinó que los absorbedores de un cuerpo son teóricamente maduros y están bien optimizados mediante técnicas de

modelado y han sido validados a nivel experimental. En el caso de los absorbedores puntuales de dos cuerpos se concluye que se consideran los más adecuados para la extracción de la energía de las olas pero que se requieren más estudios en relación con las optimizaciones hidrodinámicas para aumentar su eficacia. También se concluye que el sistema de conversión más adecuado para este tipo de WECs es el generador lineal o rotativo de accionamiento directo. Finalmente, en los estudios relativos a los amarres se concluye que el sistema de amarre no afecta a la oscilación de los absorbedores puntuales y por lo tanto su efecto en la potencia extraída es mínimo.

A su vez el avance en las investigaciones de los WECs dio lugar a líneas de investigación independientes pero relacionadas entre sí como la optimización del PTO o el estudio de las variables hidrodinámicas a las que están sometidos los convertidores, y que influyen en la potencia final extraída por los dispositivos son algunas de ellas.

En el caso de los absorbedores puntuales encontramos estudios en donde se desarrollaron metodologías para la optimización geométrica de los WECs basándose en métodos de análisis estadísticos y en la hidrodinámica del sistema en el dominio de la frecuencia. Estas optimizaciones geométricas tuvieron como objetivo maximizar la potencia absorbida por el WEC y el ancho de resonancia del dispositivo [65] [66]. Otros estudios utilizaron como herramientas de optimización de diseño algoritmos evolutivos [67] [68], aportando metodologías de diseño optimizadas en función del sistema PTO y el control del dispositivo para mejorar los costes y la extracción de energía del dispositivo.

En lo referente a los estudios relacionados con la influencia de las variables hidrodinámicas a las que está sometido el WEC y su influencia en la potencia extraída, se encuentran numerosos estudios realizados para los absorbedores puntuales realizados mediante la herramienta computacional NEMOH, código abierto que ha sido desarrollado por los equipos del Laboratorio de Investigación en Hidrodinámica, Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Nantes [69] y que evalúa el comportamiento hidrodinámico de los WECs [70] [71].

Los estudios en relación con las variables hidrodinámicas plantearon el estudio del comportamiento de los WECs formando parques de generación. Estos estudios determinaron que la distribución de los convertidores en el mar influía de manera significativa en la potencia final extraída por los parques de generación ya que se producían interacciones hidrodinámicas entre dispositivos [72] [73]. Resultados de estos estudios evidenciaron que cuando los convertidores estaban próximos el primer array o fila del parque es el que se ve más afectado, aunque este efecto disminuye de manera más rápida en esa primera fila que en la última fila del parque. También se concluyó que cuando los WECs están suficientemente separados los efectos de las interacciones son bastante bajos y en el caso de WECs genéricos estas interacciones no dependen del período de la ola [74]. Posteriores estudios profundizaron en diferentes configuraciones y distancias entre WECs para evaluar estos efectos de manera más detallada [75] [76] [77].

También se realizaron estudios sobre la optimización de las distribuciones de par que para obtener la máxima potencia de salida de los parques. Para la optimización se hizo uso de herramientas matemáticas como son los algoritmos de optimización [78] [79] [80].

El avance en el desarrollo de las tecnologías junto con los estudios anteriormente citados originó la puesta en marcha de proyectos e investigaciones para la integración de parques de parque de generación en redes eléctricas. Aunque los parques de generación undimotrices comparten sistemas y equipamientos a la hora de la evacuación de su energía y de su conexión a la red eléctrica con otras energías oceánicas como la eólica offshore, las diferencias estructurales y de funcionamiento entre las distintas soluciones originó que cada parque de una tecnología concreta fuera objeto de estudio.

En el desarrollo de estos estudios de parques de generación y no de convertidores individuales, se obtuvieron de forma teórica por medio de la modelización numérica, las curvas de potencia de parques de generación undimotriz que definieron la característica de la señal de salida de los parques de generación undimotriz realizándose estudios e investigaciones sobre la integración en red de parques de generación undimotriz [81] [82] [83] [84].

Dentro de algunos de estos estudios de integración en red de parques de generación undimotriz se realizaron estudios de impacto en la estabilidad de la red ante la integración de este tipo de energía, que dado que es el tema central de la presente tesis doctoral se ha realizado un apartado diferenciado en donde a continuación se describen los estudios e investigaciones en este campo.

### 3.1.2 Estudios de estabilidad de redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz.

Se ha realizado una revisión bibliográfica en profundidad sobre los estudios de estabilidad realizados hasta el momento sobre el impacto de la integración de energía undimotriz en redes eléctricas.

Cuando las primeras tecnologías de energía undimotriz llegaron a la etapa comercial, a principios del siglo XXI, se implementaron los primeros parques de generación y centrales en tierra y se comenzaron a realizar estudios preliminares del impacto ante su integración en redes eléctricas.

Encontramos un estudio preliminar se evidencia que debido a la gran variedad de soluciones tecnológicas los estudios de estabilidad de red se deben hacer de manera diferenciada para cada tipo de tecnología pero que las oscilaciones de potencia es un problema común de todas ellas. Esta investigación estudio el efecto de un solo WEC o de varios formando parque. En el caso de un convertidor si la conexión se realiza a una

red de distribución no a una red de gran tamaño se concluye que puede crear en la red local efectos como los armónicos, flickers, o afectar al rendimiento frente a fallos de la red. Generalmente estos dispositivos se conectan a la red mediante convertidores electrónicos de potencia que también tendrán efecto en los armónicos. También se plantea que si no existe un buffer de control se producirá una variación de la frecuencia en alrededor de 0.2Hz. En el caso de un parque de generación se concluye que si se eligen como tecnología a integrar, convertidores que puedan controlar la potencia reactiva estos convertidores pueden contribuir al control de la tensión en la red, para el control de la frecuencia sería necesario poder controlar la potencia activa. En el caso del control de la frecuencia de red se concluye a además de controlar la potencia activa entregada por el parque de generación se necesita el respaldo de la potencia térmica del sistema eléctrico, cuánto más grande mejor [85].

Otros estudios más actuales determinaron que dependiendo del porcentaje de penetración de la energía undimotriz en red y de las condiciones de conexión del parque se producían o no perturbaciones en la estabilidad de la red cumpliendo con los códigos de red y los estándares IEEE para los niveles de tensión, armónicos o flickers. Pero cuando se aumentaba considerablemente el porcentaje de penetración de energía o no se aplicaban estrategias de control de la señal a inyectar a red, los parques de generación undimotriz generaban perturbaciones en los parámetros que definen la estabilidad de los sistemas eléctricos como la tensión o los flickers, abriendo una nueva línea de investigación dedicada a la estabilidad en red ante la integración de parques de generación undimotriz [86].

Así estudios encaminados a estimar el nivel de flickers inducido por parques de generación undimotriz concluyen que en base al período energético del oleaje ( $T_e$ ), los niveles de potencia máxima y mínima producidos por el parque de generación undimotriz y otros parámetros vinculados al almacenamiento de la energía son suficientes para evaluar el nivel de flickers generado por el parque [87]. Dando como resultado que, para una variabilidad de potencia dada, es probable que el nivel de flickers sea mayor en las redes débiles (es decir, generalmente de baja tensión, las redes rurales donde la relación  $X / R$  es baja), que en las redes más fuertes (mayor tensión, altamente interconectadas) [88] [89]. Por lo tanto, el impacto de un dispositivo no se puede determinar de acuerdo con sus propias características solamente y se deben realizar estudios específicos para cada sitio de conexión potencial [88]. Por otro lado, se ha evidenciado que, la relación de cortocircuito, el número de dispositivos que componen el parque y el ángulo de impedancia de la red también son variables que tienen una fuerte influencia en la aparición de flickers [87]. Esta situación hizo plantearse el estudio del impacto en los flickers con profundidad, ya que se consideró un factor determinante y restrictivo para la correcta integración en red de un parque de generación undimotriz [90]. Resultado de estos estudios fue el llamado coeficiente de flickers [89]. Este coeficiente de flickers demostró que, el flickers vinculado al recurso del oleaje es más significativo en olas de

períodos ( $T_e$ ) más bajos y particularmente en olas de altura significativa ( $H_s$ ) más altas [89].

Otros estudios han evaluado la influencia del ángulo de impedancia concluyendo que para valores bajos de este parámetro los parques de generación undimotriz pueden conectarse a la red sin causar flickers o perturbaciones en la tensión, siempre que se aplique un factor de potencia adecuado [91] [92]. Aunque también se concluye que esta técnica es insuficiente planteando el uso de otros sistemas mitigadores como por ejemplo el uso de sistemas de almacenamiento [91] [92].

En lo relativo a los estudios que evalúan la estabilidad en la tensión de red se concluyó que, debido a la alta variabilidad de la potencia inyectada a la red por los parques de generación undimotriz se producían fluctuaciones en la tensión debiéndose aplicar medidas para compensación de la potencia reactiva como por ejemplo el uso de un convertidor del lado de red más el uso de sistemas complementarios que realicen una compensación adicional [93], como por ejemplo los sistemas de almacenamiento energético. Estudios han concluido que si el parque de generación de olas no presenta este tipo de sistemas compensatorios los problemas respecto a la fluctuación de la tensión y los problemas del factor de potencia se acercan a los límites establecidos por los códigos de red [94].

También se ha demostrado en los estudios relacionados con la tensión que la relación mínima de cortocircuito por encima de la cual el impacto en la calidad de la energía es insignificante es menor en los parques de generación undimotriz en comparación con los parques eólicos [91].

En el caso de la estabilidad del ángulo estudios han evaluado que las variaciones de potencia potencialmente rápidas y grandes inducidas por los parques de generación undimotriz pueden hacer que este ángulo de carga supere sus límites de estabilidad. Esto daría como resultado una pérdida de sincronismo y por lo tanto afectaría a la estabilidad del sistema eléctrico [88].

En lo referente a los estudios realizados para evaluar la estabilidad de la frecuencia ante la integración de parques de generación undimotriz, objeto de la presente tesis doctoral, encontramos un estudio donde se evalúa el impacto en la frecuencia de una red continental ante la integración de tecnología energía undimotriz. Este estudio concluye que se producen oscilaciones de frecuencia ante la integración, en concreto caídas de frecuencia, pero también afirma que si realiza una planificación adecuada se puede inyectar la energía a la red de forma segura. También se concluye que entre mayor sea el despacho de potencia activa hacia el sistema eléctrico más oscilaciones aparecen. Para el caso de evaluación en el estudio se propone como valor solución la cifra de 3.125% de potencia a inyecta a una red tipo IEE de nueve nodos. Para zonas no interconectadas a una red de gran tamaño o redes aisladas (zonas rurales) se toma como valor de potencia límite que no provoca oscilaciones como 20MW [95].

Finalmente destaca, entre las investigaciones realizadas en este ámbito, la tesis realizada por la Dr. Anne Blavette [96] sobre la integración de parques de generación undimotriz y su impacto en la red eléctrica de Irlanda. En donde se desarrollan los siguientes bloques fundamentales: el impacto de la integración de un parque de generación en la calidad de la energía de la red local a integrar, el estudio de los niveles de parpadeo o flickers en relación con su potencia nominal, así como la relación con el ángulo de impedancia del nodo en la red a la que está conectado el parque.

Estos estudios referentes a la estabilidad de red ante la integración de parques de generación undimotriz han encontrado otra barrera para la conexión a la red de dispositivos de energía oceánica, los códigos de red existentes, principalmente escritos en el contexto de la energía eólica, que pueden ser irrelevantes o inadecuados para los parques de generación undimotriz [88].

La necesidad de establecer modelos dinámicos que demuestren claramente que este tipo de tecnologías cumplen con los códigos de red se plantean como necesarios [88].

De esta revisión bibliográfica referente a los estudios de estabilidad ante la integración de la energía undimotriz podemos concluir que se han realizado amplios estudios en relación con la estabilidad de la tensión en redes continentales de gran tamaño en concreto estudios en profundidad sobre el fenómeno de parpadeo o flickers.

Estos estudios concluyen que bajo determinadas condiciones la integración de parques de generación undimotriz no provocan perturbaciones significativas en la red eléctrica pero que hay factores como las propias de la red a integrar, la distribución del parque en el mar o la utilización de sistemas de almacenamiento energético como complemento a los sistemas de control implementados, son factores determinantes para cumplir los límites establecidos por los códigos de red para la estabilidad del sistema.

A continuación, y dada la importancia de estos sistemas de suavizamiento de la señal o también denominados power smoothing en la estabilidad de la red ante la integración de energía undimotriz se ha realizado una revisión bibliográfica sobre los estudios e investigaciones realizados en este ámbito.

### 3.1.3 Estudios de alisado de la potencia (power smoothing) para contribuir a la estabilidad de la red ante la integración de energía undimotriz.

En el caso de los estudios de alisado de potencia al realizar la revisión bibliográfica la mayoría de las publicaciones científicas al respecto giran en torno al uso de sistemas de almacenamiento energético, en sus siglas en inglés *Energy Storage Systems (ESS)*, como complemento a estrategias de control implementadas previamente.



En relación con los estudios en donde se analizan la viabilidad de los ESS, se encuentran estudios en donde se plantea qué esquema de almacenamiento contribuye de manera más eficiente a alisar la potencia del parque de generación undimotriz, si un sistema centralizado o un sistema descentralizado en donde cada WEC tendría su propio ESS integrado [97]. Dentro de estos estudios se concluye que el ESS para que caso de un sistema centralizado es de menor tamaño pero que se presentan mayores fluctuaciones en los puntos de salida individuales de cada WEC. Aunque la opción del sistema centralizado es la que se presenta en este estudio como mejor resultado dentro del estudio se puntualiza que hay que tener en consideración en aumento de pérdidas en el inversor y el cableado del parque aspecto que hay que tener en cuenta [97] [98].

Otro aspecto analizado en los estudios de ESS son la tipología de ESS a integrar. Debido a la rápida variabilidad de la energía a almacenar, el uso de sistemas de almacenamiento rápido como supercondensadores [99] [100] [101] [102] o volantes de inercia [103] son las opciones más estudiadas. Aunque también existen estudios donde se plantea el uso de sistemas híbridos de almacenamiento, o en sus siglas en inglés *Hybrid Energy Storage Systems* (HESS), integrando baterías y supercondensadores como ESS [104] o convertidores electrónicos de potencia y supercondensadores [105], son algunos ejemplos.

Estos estudios concluyen que la tecnología de almacenamiento que presenta mejores resultados son los supercondensadores ya que pueden proporcionar un buen rendimiento al tiempo que garantiza al mismo tiempo la viabilidad técnica/económica del sistema general [100], además se presenta como mejor opción frente a las baterías debido a su bajo requisito de mantenimiento y que plantean una mejor capacidad de energía [101].

Todos los estudios de viabilidad de tecnologías de almacenamiento concluyen que la estrategia de control es fundamental para que se den resultados óptimos en el suavizamiento de la señal.

También se encontraron estudios que plantean como herramienta para el suavizamiento de la señal del parque estrategias a la hora de la distribución espacial del parque en el mar como complemento a otros sistemas de control.

Encontramos diversas publicaciones científicas al respecto en donde se realizan modelizaciones numéricas de distribuciones de parque de generación de olas, planteando diferentes configuraciones de arrays y teniendo en cuenta aspectos como la separación entre convertidores [106]. Se concluye de estos estudios que el efecto del alisado de la potencia no depende del estado de mar ni del diseño de la matriz, sino del número de convertidores por array y que la distancia entre convertidores no parece tener una gran influencia en el efecto suavizante [107]. Por otro lado, afirman que es posible obtener una potencia de salida cerca del estado de operación estacionario, lo que minimizará la fluctuación la tensión y la frecuencia y el impacto en el sistema de red [108]. Sin embargo, se cuantifica en estos estudios, que este equilibrio entre la potencia de salida y las fluctuaciones tendrá un impacto directo en el costo de la energía [108].

También se han realizado estudios combinando sistemas de almacenamiento con estrategias de distribución espacial de los WECs en el mar [109]. Dentro de este estudio en donde se integran sistemas de almacenamiento energético individuales para cada dispositivo y se proponen diferentes configuraciones de parque se concluye que la óptima distribución de los convertidores en el mar proporciona una potencia de salida más uniforme y que por lo tanto se necesitarían sistemas de almacenamiento de menor tamaño pero mediante un sistema de almacenamiento de energía centralizado y no individual para cada convertidor, proponiendo como tecnología de almacenamiento el volante de inercia o los supercondensadores para dar soporte a la estabilidad de la red [109].

En el caso de la aplicación de estrategias de Power Smoothing para el caso del absorbedor puntual, tecnología seleccionada a integrar en la presente tesis doctoral, por parte del grupo de *Sistemas Eléctricos de Potencia del Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT)* se han realizado estudios en donde se analizan estrategias conjuntas entre distribución espacial de los convertidores en el mar, estrategias de control mediante convertidores electrónicos de potencia y sistemas de almacenamiento [110].

En este estudio se estudia el problema de las oscilaciones de potencia causadas por la tecnología tipo absorbedor puntual que como sistema de conversión presenta un generador lineal de accionamiento directo. En él se analizan cuatro soluciones diferentes: en la primera se plantea cómo planificar la distribución de los absorbedores en el mar; en segundo lugar se plantea una estrategia de control del dispositivo cuyo objetivo es el de obtener una oscilación de potencia más reducida, manteniendo un compromiso entre la situación de resonancia del dispositivo para obtener la máxima potencia posible del dispositivo; en tercer lugar se plantea una estrategia híbrida de control mediante un control de la tensión y un control de potencia directo; y finalmente en cuarto lugar se plantea el uso de sistemas de almacenamiento de energía independientes para cada convertidor. Como resultado se obtiene que la primera solución por sí sola no reduce significativamente las oscilaciones de potencia, al igual que las soluciones dos y tres [110].

En el caso de la solución cuatro, los sistemas de almacenamiento energético resuelven por sí mismos las oscilaciones de potencia, pero se plantea la combinación de esta solución con otras de las planteadas para reducir los requisitos del sistema de almacenamiento [110].

Por lo tanto, de la revisión bibliográfica de las publicaciones científicas relativas a las estrategias Power Smoothing se concluye que la estrategia óptima sería la combinación de estrategias de control más sistemas físicos como la óptima distribución de los convertidores en el mar y la integración de sistemas de almacenamiento rápido como los supercondensadores o los volantes de inercia. Estos estudios realizados han evaluado en su gran mayoría si se produce una reducción en las oscilaciones de potencia del parque de generación, pero algunos han evaluado de manera muy preliminar el efecto de esta reducción en la estabilidad de la red.

---

## Capítulo 4

---

### 4 *Objetivos, contribuciones y metodología de la tesis.*

#### 4.1 *Objetivos de la tesis.*

En base al marco teórico descrito en el Capítulo 2 donde se resumen los aspectos más relevantes sobre la problemática que se quiere resolver, y la revisión del estado del arte actual que se expone en el Capítulo 3 se han planteado los siguientes objetivos principales dentro de la presente tesis doctoral:

- Estudiar los efectos sobre la estabilidad de la frecuencia de una red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación de energía undimotriz en la misma.
- Estudiar acciones que mitiguen el impacto de la integración y que permitan un alisado de la potencia de generación undimotriz inyectada en la red eléctrica débil, cumpliendo los requisitos establecidos por el operador del sistema.

Para cubrir estos objetivos principales se plantean como objetivos secundarios:

- Evaluar el recurso undimotriz perteneciente a un territorio insular como caso de ejemplo de una red eléctrica débil.
- Integrar un modelo de solución tecnológica de captación de la energía del oleaje que permita realizar el aprovechamiento óptimo del recurso undimotriz evaluado.
- Integrar un modelo perteneciente a una red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia en base a los parámetros definidos por el operador del sistema.
- Desarrollar un modelo del sistema completo (recurso undimotriz, tecnología de captación de energía undimotriz y red eléctrica débil) como herramienta para la realización del estudio de estabilidad en el régimen de la frecuencia.
- Desarrollar una metodología de análisis de la estabilidad de la frecuencia en una red eléctrica débil ante la integración de energía undimotriz en su sistema.
- Desarrollar estrategias que contribuyan a mitigar el impacto en la estabilidad de la frecuencia de red, alisando la potencia del sistema de generación undimotriz, cumpliendo con lo establecido por el operador del sistema.
- Desarrollar una metodología de integración de mecanismos, como pueden ser los sistemas de almacenamiento de energía, que contribuyan a mitigar los posibles impactos en la frecuencia de red y las condiciones de la integración de la energía undimotriz en la red eléctrica débil, cumpliendo con lo establecido por el operador del sistema.

## 4.2 Contribuciones de la tesis.

A partir del análisis del estado del arte para los diferentes ámbitos de estudio tratados en la presente tesis doctoral y del planteamiento de los objetivos marcados para la misma a continuación, se resumen las principales contribuciones que se han realizado dentro de la tesis doctoral.

Como se ha detallado en el estudio de estado del arte, las investigaciones realizadas para analizar la estabilidad de las redes eléctricas ante la integración de energía undimotriz se han centrado en redes eléctricas continentales o de gran tamaño no en sistemas eléctricos débiles o aislados como es el caso en el que se quiere centrar la presente tesis doctoral.

Estos estudios de estabilidad en redes eléctricas continentales ante la integración de energía undimotriz se han focalizado en el análisis de la estabilidad de la tensión o de fase, pero no analizan la estabilidad de la frecuencia, aspecto que se analiza en la presente tesis doctoral.

En esta tesis doctoral se utiliza como modelo de captador de energía undimotriz, para modelar el parque de generación a integrar en la red eléctrica débil, el absorbedor puntual de dos cuerpos. Las soluciones tecnológicas actuales de este modelo de captador presentan actualmente un porcentaje significativo del total de soluciones tecnológicas existentes. La mayoría de las tecnologías tipo absorbedor puntual en fase de desarrollo tecnológico se encuentran en un nivel de madurez TRL6: ensayo en entorno relevante (ensayo en mar) y por lo tanto los resultados obtenidos en el presente estudio se podrán validar en un futuro cercano. Este aspecto destacable no sucede para otros estudios de estabilidad de red ante la integración de energía undimotriz que utilizan como base de estudio tecnologías en fase de modelización teórica o no operativas a nivel tecnológico.

En el presente estudio se propone una metodología de análisis de estabilidad de la frecuencia, pero también una metodología de solución a los casos desfavorables aportando estrategias que mejoran la calidad de la potencia del parque undimotriz contribuyendo a incrementar el % de energía entregada mediante un sistema de almacenamiento que alisará la potencia generada por el parque de generación undimotriz. La mayoría de las investigaciones encontradas realizan estudios particulares para un tipo de tecnología no estableciendo metodologías o procedimientos que puedan ser utilizados de manera general para definir cuál es la tecnología de almacenamiento más adecuada para una determinada aplicación o situación de partida.

La metodología propuesta en el presente documento también contribuirá en el ámbito de desarrollo de la investigación aplicada de la energía undimotriz, sirviendo de herramienta para la evaluación previa por parte de los tecnólogos de la viabilidad de los parques undimotrices que planteen integrar a la red, verificando si cumplen o no los requisitos

establecidos por el operador del sistema eléctrico correspondientes a la estabilidad de la frecuencia de red.

Cabe destacar que fruto de esta tesis doctoral se han desarrollado una serie de publicaciones científicas:

- ***Wave farms grid code compliance in isolated small power systems.*** Autores: Isabel Villalba, Marcos Blanco, Juan Ignacio Pérez, Daniel Fernández, Felipe Díaz, Marcos Lafoz. Revista: IET Renewable Power Generation. Special Issue: Oscillations in Power Systems with High Penetration of Renewable Power Generations. Año: 2019.
- ***Evaluation of the economic potential of the integration of wave power converters into isolated electrical systems within the European Atlantic Area. Case: Gran Canaria Island.*** Autores: Isabel Villalba, Felipe Díaz. Congreso internacional: Oceans'17 MTS/IEEE Aberdeen. Año: 2017
- ***Multiobjective Optimisation of a Wave Energy Farm.*** Autores: Isabel Villalba, David Greiner, Felipe Díaz, Marcos Blanco, Marcos Lafoz, Juan Ignacio Pérez. Congreso internacional: 6th European Seminar of Computing ESCO. Praga. Año: 2018.

Otras publicaciones de interés:

- ***Meta-heuristic optimisation approach for wave energy converter designing by means of a stochastic hydrodynamic model.*** Autores: Marcos Blanco, Miguel Santos-Herran, Gustavo Navarro, Jorge Torres, Jorge Najera, Isabel Villalba, Marcos Lafoz, Dionisio Ramírez. Revista: IET Renewable Power Generation. Año: 2020.

### 4.3 Metodología general de la tesis.

Tomando como base los objetivos expuestos en el apartado anterior a continuación, se define la metodología general de estudio llevada a cabo para la realización de la presente tesis doctoral.

En primer lugar, se ha procedido a evaluar los parámetros y desarrollar los modelos necesarios para la integración de un parque de generación undimotriz en una red eléctrica débil.

Se ha seleccionado una localización para el parque de generación undimotriz dentro de un territorio insular del Espacio Atlántico Europeo. Este territorio insular cumple con

las características que definen una red eléctrica débil. Como territorio insular de aplicación dentro de la presente tesis doctoral se ha seleccionado la isla de Tenerife perteneciente al archipiélago de las Islas Canarias dentro del espacio ultraperiférico denominado la Macaronesia.

Una vez seleccionada la localización se ha procedido a la evaluación del recurso del oleaje en diferentes puntos de la costa de la isla, determinando el emplazamiento óptimo. Finalmente, y mediante datos de oleaje real cedidos por Puertos del Estado provenientes de sus boyas de medición de oleaje se ha realizado un estudio del oleaje y se han determinado los eventos de oleaje que presentan una mayor presencia. Estos eventos de oleaje serán la base para la obtención de los perfiles de oleaje que se utilizarán como entrada al modelo de tecnología de captación.

A continuación, se ha realizado una selección de la tecnología que realice el aprovechamiento óptimo de dicho recurso del oleaje. Como solución tecnológica se ha seleccionado un absorbedor puntual de dos cuerpos cuyo sistema de extracción de potencia o PTO es un generador eléctrico lineal de reluctancia conmutada [111] [112]. El modelo del PTO que se ha integrado en la presente tesis doctoral es resultado de las investigaciones realizadas por el grupo de investigación de la Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia (USEP) del *Centro de Investigaciones Medioambientales y Energéticas (CIEMAT)* dentro de los proyectos Undigen y Undigen+.

Para la modelización absorbedor puntual de dos cuerpos se ha tenido en cuenta el hecho que el absorbedor puntual es un cuerpo sumergido en un fluido y que se rige por las leyes establecidas en la mecánica de fluidos. También se han tenido en cuenta las fuerzas a las que está sometido el cuerpo. Este aspecto hace necesario el cálculo de las variables hidrodinámicas que actúan en el cuerpo para posteriormente realizar el cálculo de la potencia generada por absorbedor puntual. Para el cálculo de las variables hidrodinámicas se ha hecho uso de la herramienta computacional de acceso abierto *NEMOH* [113] implementada en Matlab-Simulink y desarrollada por el Laboratorio de Investigación en Hidrodinámica, Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Nantes [69].

Una vez establecidas las variables hidrodinámicas se ha procedido al cálculo de las fuerzas que actúan sobre el dispositivo y la potencia generada por el absorbedor puntual. Para realizar dicho cálculo se hizo uso de la herramienta computacional de acceso abierto *Wave Energy Converter Simulator (WEC-Sim)* [114] implementada en Matlab-Simulink, basada en la teoría de elementos de contorno (BEM), y desarrollada por National Renewable Energy Laboratory (NREL) [115] con la colaboración de Sandia National Laboratories [116].

Determinada la potencia extraída por parte del absorbedor puntual de dos cuerpos, utilizando la información de los modelos de WEC-Sim y el modelo de PTO para obtener un modelo de captador completo, se ha procedido a plantear la unión de varios

convertidores y el cálculo de la potencia de la potencia del parque de generación undimotriz. Para el cálculo de la potencia del parque de generación se tuvo en cuenta la interacción hidrodinámica entre los convertidores y el mar, pero no entre los dispositivos, así como la distribución espacial del parque el mar.

El modelo de red eléctrica débil que se ha utilizado se ha modelizado en el régimen de la frecuencia. Dicho modelo ha sido cedido, para la realización de la presente tesis doctoral, por miembros del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid. En el caso de las islas Canarias la gestión de la estabilidad de las redes eléctricas insulares es realizada por el *TSO REE*. Para su modelización se han tenido en cuenta los parámetros y eventos relativos a la estabilidad de la red eléctrica para territorios insulares, así como las características propias de estos sistemas relativos a la regulación primaria y secundaria.

La evaluación del recurso del oleaje, modelo de solución tecnológica, modelo de parque de generación y red eléctrica débil se explican y analizan con mayor profundidad en el Capítulo 5 de la presente tesis doctoral y han sido implementados haciendo uso de la herramienta computacional Matlab Simulink.

En el Capítulo 6 se ha realizado una integración conjunta de los modelos anteriores y se ha procedido a realizar un estudio de la estabilidad de la frecuencia, con el objetivo de generar una metodología para el análisis de la estabilidad de la frecuencia en una red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación de energía undimotriz.

Para aplicar la metodología de análisis en primer lugar se han establecido los parámetros base relativos al modelo de la red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia y los parámetros relativos al parque de generación de olas. Se han planteado diferentes escenarios de generación variando parámetros como: el recurso del oleaje, la distribución de los convertidores en el mar o el ángulo de incidencia del oleaje.

Una vez obtenidos los resultados del análisis se ha procedido a evaluar si existen o no desviaciones de la frecuencia y por lo tanto perturbaciones significativas en la estabilidad de la frecuencia de red de la isla de Tenerife mediante un estudio estadístico.

Por último, dentro del Capítulo 7, para contribuir a aumentar la penetración de la energía undimotriz en la red eléctrica débil, en los casos en que se produzcan perturbaciones en la estabilidad de la frecuencia, se ha realizado un modelo solución que contribuya a suavizar la señal de entrada a la red proveniente del parque de generación undimotriz disminuyendo los eventos de la frecuencia fuera de los límites de operación normal del sistema.

Como modelo solución se toma como base la línea de investigación referenciada en el apartado de la revisión bibliográfica dedicada a los mecanismos de alisado de potencia y su aplicación en sistemas de energía undimotriz: la integración de sistemas de almacenamiento energético.

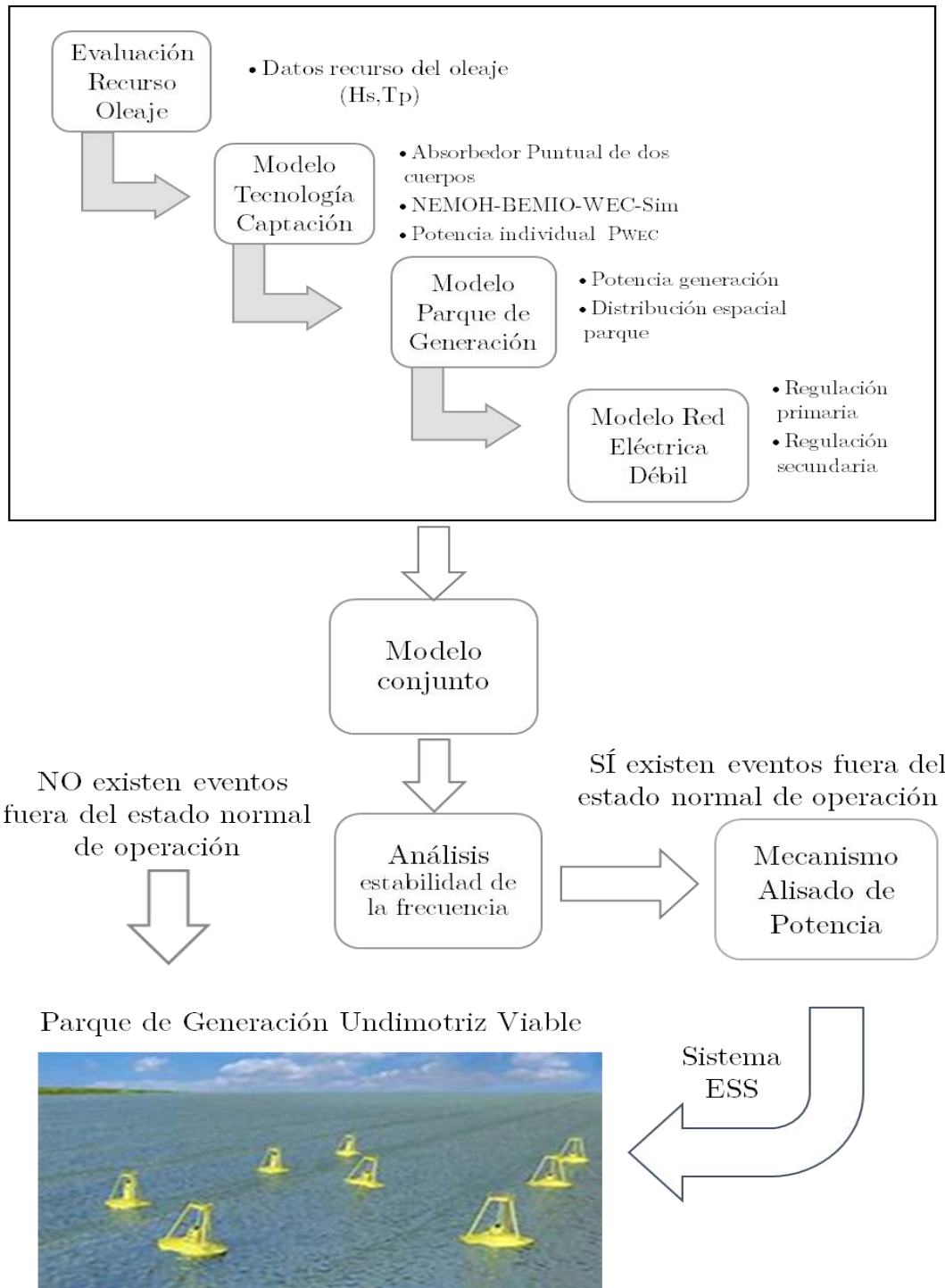


Figura 28. Diagrama Flujo Metodología General de la tesis. Fuente: elaboración propia.

Para el modelo de alisado con sistemas de almacenamiento energético se ha planteado una metodología de integración de un sistema de almacenamiento (*ESS*) que contribuya a minimizar los eventos fuera del estado normal de operación, pero teniendo en cuenta no sólo la dimensión de la viabilidad técnica de la tecnología de almacenamiento sino también la dimensión económica. Se ha tomado este criterio de estudio debido a que actualmente la integración de sistemas de almacenamiento como complemento de



operación para sistemas de generación renovable está condicionada en la mayoría de los casos por consideraciones económicas, siendo un factor decisivo a la hora de la selección de la tecnología de almacenamiento a integrar.

Para finalizar es de interés reseñar que la presente metodología ha sido establecida no sólo en base a la investigación teórica también se han tomado como base las experiencias adquiridas en el desarrollo de proyectos de investigación aplicada en el ámbito de la energía undimotriz. Durante la realización del presente trabajo de investigación se ha tenido la oportunidad de realizar un trabajo activo con un prototipo de captación de energía undimotriz (ensayo en laboratorio y en entorno relevante) que se encontraba en un nivel de madurez tecnológica avanzado. Esta experiencia ha servido de gran valor a la hora de establecer una metodología que presenta una aplicabilidad futura.



---

## Capítulo 5

---

### 5 Desarrollo de Modelos para el Análisis.

#### 5.1 Introducción.

Una vez descrita la metodología general que se ha llevado a cabo para la realización del presente estudio, dentro del Capítulo 5 se van a describir los modelos base desarrollados para la realización del estudio de estabilidad de la frecuencia de una red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación undimotriz.

El conjunto de modelos desarrollados se resume en la Figura 29. En primer lugar, se realizará una explicación teórica de cada apartado y posteriormente se aplicará al caso estudio seleccionado como ejemplo para la presente tesis doctoral, la red eléctrica débil de la isla de Tenerife.

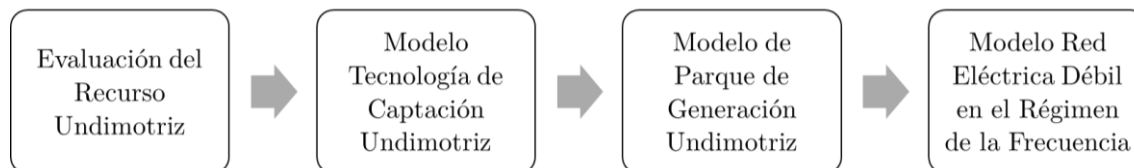


Figura 29. Diagrama Integración Parque de Generación Undimotriz Red Eléctrica Débil. Fuente: elaboración propia.

- La **evaluación del recurso del oleaje** o recurso undimotriz en la localización seleccionada se realiza con el objetivo de establecer la localización viable para la instalación del parque de generación undimotriz donde se realice un aprovechamiento adecuado del recurso undimotriz. Como resultado de esta evaluación del recurso undimotriz se obtendrán los valores del potencial energético en la zona, así como los estados de mar más representativos de la misma.
- El **modelo de tecnología de captación**. Se procede a la selección de la tecnología de captación que integrará el parque de generación undimotriz. En este apartado se procederá a su modelización numérica mediante herramientas computacionales. El objetivo es obtener un modelo de tecnología de captación en función de sus características geométricas, hidrodinámicas y de comportamiento. Como resultado del modelo de captación se obtendrá entre otros parámetros y

variables de interés la potencia eléctrica generada por cada unidad de dicha tecnología que se utilizará posteriormente como variable de entrada al modelo de parque de generación undimotriz.

- El **modelo de parque de generación undimotriz** se realizará en función de las variables características de distribución espacial del parque en el mar. El objetivo del modelo de parque es establecer la potencia del parque de generación en función de estas variables espaciales. Como resultado del modelo de parque de generación se obtendrá el perfil de potencia de generación de parque undimotriz que servirá como variable de entrada al modelo de red eléctrica débil.
- El **modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia**. Se modela la red eléctrica débil en función de las características de entrada propias de este tipo de sistemas poniendo especial atención a las relacionadas con la frecuencia de red. El objetivo de la modelización de la red eléctrica es obtener un modelo de comportamiento de la gestión de la frecuencia en una red eléctrica débil en la cual se va a integrar la potencia del parque de generación undimotriz como nueva generación renovable en el sistema. Como resultado se obtendrá el perfil de comportamiento de la frecuencia para la red eléctrica débil seleccionada como caso estudio.

## 5.2 Modelo del recurso del oleaje.

### 5.2.1 Evaluación de recurso del oleaje en una localización.

Siguiendo el diagrama que se ha expuesto en la Figura 29, el primer modelo que se desarrolla a la hora de la integración de un parque de generación undimotriz en una localización concreta es el modelo del recurso del oleaje.

El modelo del recurso del oleaje tiene como objetivo determinar el estado de mar y el potencial energético (kW/m) en esa localización concreta.

En primer lugar, hay que importar los datos de oleaje de la localización seleccionada. En muchos países existen bases de datos de acceso abierto. Por ejemplo, la web habilitada por el National Data Buoy Center [117] tiene información sobre muchas boyas meteorológicas de medida en el océano Pacífico y el Atlántico.

En el caso de España esa información es gestionada por Puertos del Estado [48] que posee una página específica para oceanografía en donde se recopilan los datos históricos y a tiempo real de las boyas de medidas del espacio marítimo español. Estos datos se han completado mediante datos de oleaje generados por modelos numéricos, los llamados puntos SIMAR.

A partir de estos datos se elabora el denominado diagrama de dispersión que da como resultado el número de puntos relacionados con cada estado de mar: altura de ola significativa  $H_s(m)$  y período de ola  $T(s)$ .

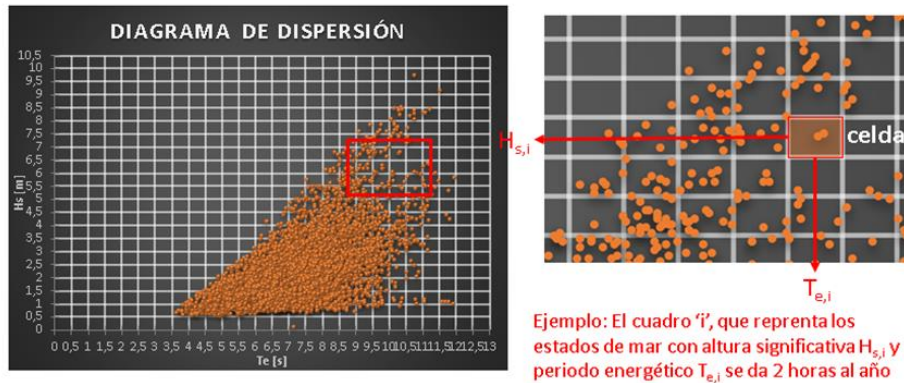


Figura 30. Ejemplo diagrama de dispersión en función datos boya de medida. Fuente: elaboración propia

A continuación, se elabora la matriz de contingencia en donde se representa el porcentaje de horas anuales en las que se presenta un cierto estado de mar. La matriz de contingencia se utiliza para la selección de los estados de oleaje que presentan un porcentaje significativo y que se utilizarán como variables de entrada en el modelo de la tecnología de captación undimotriz.

		Te																							
		0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,50	11,00	
Hs	0,00															0,01									
	0,50								0,03	0,25	0,30	0,35	0,19	0,12	0,03	0,04	0,07	0,01			0,01				
	1,00								0,39	0,79	2,56	3,16	3,34	3,28	2,34	2,16	1,16	0,60	0,21	0,15	0,08	0,04	0,04	0,06	
	1,50								0,03	0,57	2,70	5,02	5,40	4,38	2,42	2,08	1,30	0,76	0,35	0,29	0,06				
	2,00									0,44	1,54	2,74	3,53	2,66	2,42	1,83	0,90	0,40	0,33	0,06	0,03	0,03			
	2,50									0,01	0,39	1,07	2,24	2,09	2,58	2,16	1,16	0,93	0,58	0,17	0,03				
	3,00										0,01	0,36	0,83	1,27	1,41	1,57	1,03	0,62	0,57	0,24	0,06	0,03			
	3,50											0,04	0,30	0,71	1,03	0,62	0,80	0,57	0,44	0,22	0,24	0,07			
	4,00												0,06	0,39	0,55	0,48	0,65	0,54	0,44	0,18	0,15	0,04			
	4,50															0,11	0,26	0,35	0,35	0,42	0,29	0,10	0,12	0,08	
	5,00																0,03	0,11	0,22	0,26	0,19	0,15	0,06	0,06	0,08
	5,50																	0,07	0,14	0,19	0,28	0,07	0,08	0,04	0,06
	6,00																	0,01	0,04	0,11	0,15	0,10	0,07	0,03	0,03
	6,50																			0,06	0,08	0,07	0,03	0,01	0,04
	7,00																			0,04	0,07	0,14	0,03	0,04	
7,50																				0,01	0,10	0,10	0,07		
8,00																					0,01	0,07	0,04		
8,50																						0,01	0,06	0,06	

Figura 31. Ejemplo matriz de contingencia a partir del diagrama de dispersión. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, existen las llamadas matrices de potencia de las tecnologías de captación que han sido elaboradas a partir de datos obtenidos de los ensayos en tanque o entorno real de los dispositivos. Al multiplicar elemento a elemento la matriz de potencia de la tecnología de captación por la matriz de del diagrama de contingencia obtenida anteriormente expresada por unidad obtenemos la matriz de energía, es decir cuánta

energía obtendríamos en esa localización al ubicar ese tipo de tecnología de captación allí.

El sumatorio de todos los elementos de dicha matriz de energía nos da la potencia del oleaje ( $\text{kW/m}$ ) en la localización. La variable de la potencia del oleaje se utiliza cuando se quiere caracterizar el recurso de una localización con un solo valor y es de gran utilidad a la hora de evaluar la viabilidad de la zona propuesta para la ubicación de parques de generación undimotriz.

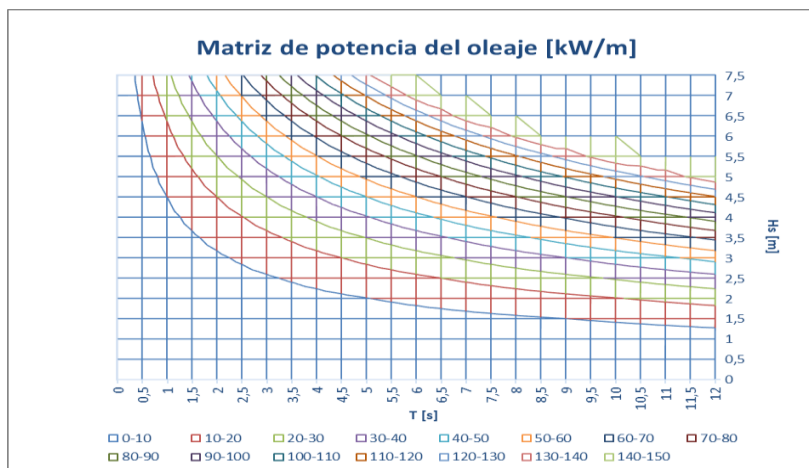


Figura 32. Ejemplo matriz de potencia del oleaje ( $\text{kW/m}$ ). Fuente: elaboración propia.

### 5.2.2 Aplicación de la evaluación del recurso del oleaje a la isla de Tenerife.

El objetivo de este apartado es el de establecer distintos estados de mar que van a servir como variables de entrada a nuestro modelo de generación de parque undimotriz para la isla de Tenerife.

Se ha procedido a la evaluación del recurso del oleaje de la isla de Tenerife para determinar la localización viable del parque de generación undimotriz.

Dentro del apartado “*Estudios de integración de la energía undimotriz en redes eléctricas*”, del Capítulo 3 del presente documento se hace referencia a un estudio donde se ha evaluado de manera teórica el recurso del oleaje en distintas localizaciones de la costa de la isla de Tenerife. En dicho estudio se establece la zona norte de la isla, donde el potencial energético ronda los  $21 \text{ kW/m}$  con estado de mar de olas de entre  $1,5\text{m}$  y  $3\text{m}$  de altura significativa de ola ( $H_s$ ) y períodos pico entre  $10\text{s}$  y  $14\text{s}$  [59], como la zona óptima para la integración de un parque de generación undimotriz.

Tomando como referencia esta localización (punto 5) se realizó una búsqueda de datos del recurso undimotriz de la zona. Como se expuso en el apartado de antecedentes, dentro

de la web de Puertos del Estado [48] existen dos tipologías de datos históricos relativos al oleaje en localizaciones concretas, los datos de modelado numérico (puntos SIMAR) o los datos recopilados en las boyas de medida.

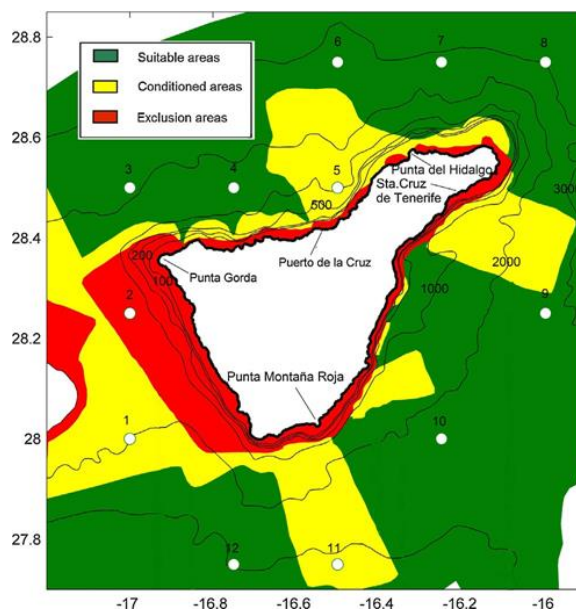


Figura 33. Zonas estudio recurso del oleaje isla de Tenerife [59].

En el caso de la isla de Tenerife no existe ninguna boya de medida de datos a tiempo real activa, sólo existen datos obtenidos de modelo numérico (puntos SIMAR). Como solución para el uso de datos de medida real para el presente caso de estudio se planteó la alternativa de evaluar la viabilidad de los datos existentes en otra boya de medida cercana, la situada en el norte de la isla de Gran Canaria, la boya Gran Canaria, y evaluar si estos datos podían extrapolarse a la costa norte de la isla de Tenerife para la determinación de la matriz de contingencia en esa zona.

Se procedió a comparar los datos del punto SIMAR 4035011 en el norte de Gran Canaria con el punto SIMAR 4021014 del norte de Tenerife (ver Anexo Capítulo 5). La serie temporal analizada va desde enero de 1958 hasta mayo de 2017 para ambos casos, y tiene amplitud anual. Se han estudiado las variables  $T_p$  (s), **periodo de pico**, y  $H_s$  (m), **altura significativa** de ola.

Se ha trabajado con los datos de porcentaje de eventos totales para ambas variables  $H_s$  (Tabla 7) y  $T_p$  (Tabla 8). Como se observa en la Tabla 7 y la Tabla 8, los valores de  $H_s$  y  $T_p$  entre ambos puntos SIMAR difieren muy poco. Las medias de eventos en ambas variables son idénticas, y tienen una desviación estándar similar.

Hs (m)	Eventos (%)			
	Tenerife	Gran Canaria	Error Absoluto	Error Ponderado
< 0,5	0,571	1,062	0,491	0,004009015
1	16,227	17,559	1,332	0,22501476
1,5	34,238	34,15	0,088	0,03009072
2	25,886	25,709	0,177	0,045661575
2,5	12,892	12,862	0,03	0,0038631
3	6,001	5,47	0,531	0,030455505
3,5	2,467	2,071	0,396	0,00898524
4	0,986	0,71	0,276	0,00234048
4,5	0,421	0,258	0,163	0,000553385
5	0,176	0,096	0,08	0,0001088
>5	0,135	0,053	0,082	0,00007708
<b>Media</b>	9,090909091	9,090909091	3,646	0,35115966
<b>Desviación</b>	11,8590754	11,94886719		

Tabla 7. Datos altura significativa de ola (Hs). Fuente: elaboración propia.

Como estadísticos y métrica se ha empleado el coeficiente de correlación de Pearson y el MAE ponderado. En este caso, además se ha ponderado por la probabilidad media del evento para cada H<sub>s</sub> o T<sub>p</sub> (Tabla 9 ).

Tp (s)	Eventos (%)			
	Tenerife	Gran Canaria	Error Absoluto	Error Ponderado
< 2				
4	0,021	0,069	0,048	0,0000216
6	2,607	4,243	1,636	0,056033
8	26,895	28,302	1,407	0,388310895
10	25,875	24,466	1,409	0,354652345
12	23,257	21,6371	1,62	0,3636414
14	15,69	15,503	0,187	0,029165455
16	4,444	4,529	0,085	0,003813525
18	1,051	1,078	0,027	0,000287415
20	0,141	0,153	0,012	0,00001764
>20	0,019	0,02	0,001	0,000000195
<b>Media</b>	10	10	0,6432	1,19594347
<b>Desviación</b>	11,58347323	11,2930494		

Tabla 8. Datos Período Pico (Ts). Fuente: elaboración propia.

	Hs(m)	Tp(s)
<b>Pearson</b>	0,99910753	0,99636797
<b>MAE</b>	0,35115966	1,19594347

Tabla 9. Resultados estadísticos de prueba. Fuente: elaboración propia.



Como vemos en la Tabla 9 existe una correlación positiva perfecta entre ambas distribuciones pertenecientes a Gran Canaria y Tenerife en su costa norte, tanto para  $H_s$  como para  $T_p$ . En cuanto al error en eventos entre las dos islas es del 0,35% en altura de ola y del 1,19% en periodo. Por todo ello, se concluye que ambas costas son comparables en términos de recurso undimotriz.

Una vez concluido el estudio comparativo entre las costas se procedió a calcular la matriz de oleaje de los datos de medida del oleaje real pertenecientes a la Boya de Gran Canaria. Como serie temporal se utilizaron los datos cedidos por Puertos del Estado a través del servicio de señales marítimas de la Autoridad Portuaria de Las Palmas. Se presentan dos matrices de evaluación de eventos de oleaje ocurridos en función de la altura significativa de ola  $H_s$  (m) y el período tipo de ola  $T_s$  (s), la primera matriz se representa el número de eventos que presentan la misma característica de oleaje ocurridos (Figura 34) y la segunda matriz está expresada en % de eventos ocurridos (Figura 35).

Obtenida la matriz de contingencia en la cual se resumen los estados de mar de la localización se procede a la selección de los valores de recurso undimotriz, parejas de  $H_s$  (m)- $T_p$  (s) que se utilizarán como variables de entrada al modelo de tecnología de conversión. Para el caso de estudio que nos ocupa se han seleccionado cuatro valores de estados de oleaje ( $H_s$  - $T_p$ ) moderados pero que presentan un porcentaje de ocurrencia significativo siendo representativos del recurso undimotriz en la localización seleccionada (ver Tabla 10).

Recurso undimotriz		1		2		3		4	
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	1,5	12	1,5	15	2,5	12	2,5	15

Tabla 10. Valores de recurso undimotriz seleccionados en base a la matriz de contingencia obtenida para el recurso undimotriz del Norte de la isla de Tenerife.

Hs \ Tp	Tp																									io
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26		
0-0,5	0	0	2	13	30	77	22	14	11	3	3	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	179
0,5-1	14	301	646	1108	1535	2328	1579	3665	2420	3146	1368	306	570	207	30	5	44	0	0	3	0	0	0	0	0	19275
1-1,5	0	110	1538	3820	5963	6803	3722	7076	3936	6967	3705	775	1438	542	56	11	58	2	0	1	0	0	0	0	0	46523
1,5-2	0	0	199	1447	4801	8894	3482	5123	2415	4491	3194	777	1339	533	122	19	61	5	0	0	0	0	1	0	0	36903
2-2,5	0	0	13	224	1033	4318	2154	2424	1229	2122	2028	633	1223	440	91	11	60	7	1	2	7	0	0	0	0	18020
2,5-3	0	0	0	13	122	828	968	1140	453	718	886	320	612	276	73	15	74	15	0	3	2	0	0	0	0	6518
3-3,5	0	0	0	0	4	117	297	528	135	152	220	82	239	157	48	18	65	3	0	4	0	0	0	0	0	2069
3,5-4	0	0	0	0	2	14	57	180	29	51	60	28	74	123	26	6	49	3	0	0	0	0	0	0	0	702
4-4,5	0	0	0	0	0	3	6	33	32	24	19	8	31	34	8	3	22	0	0	0	0	0	0	0	0	223
4,5-5	0	0	0	0	0	0	0	22	18	8	3	5	16	15	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	91
5-5,5	0	0	0	0	0	0	0	6	1	2	1	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
5,5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
																									Total de datos	130523

Figura 34. Matriz datos de oleaje Boya Gran Canaria. Eventos ocurridos. Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados por Puertos del Estado.

Hs \ Tp	Tp																									Sumatorio
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26		
0-0,5	0,000000	0,000000	0,0015323	0,0099599	0,0229845	0,0589934	0,0168553	0,0107261	0,0084276	0,0022984	0,0022984	0,0007661	0,0015323	0,0007661	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,1371406
0,5-1	0,0107261	0,2306107	0,4949319	0,8488925	1,1760379	1,7835937	1,2097485	2,8079342	1,8540794	2,4103032	1,0480911	0,2344414	0,4367046	0,1585927	0,0229845	0,0038307	0,0337105	0,000000	0,000000	0,0022984	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	14,7675122
1-1,5	0,000000	0,0842763	1,1783364	2,9266873	4,5685435	5,2121082	2,8516047	5,4212667	3,0155605	5,3377566	2,8385802	0,5937651	1,1017215	0,4152525	0,0429043	0,0084276	0,0444366	0,0015323	0,000000	0,0007661	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	35,6435264
1,5-2	0,000000	0,000000	0,1524636	1,1086169	3,6782789	6,8141247	2,6677291	3,9249787	1,8502486	3,4407729	2,4470783	0,5952974	1,0258728	0,4083571	0,0934701	0,0145568	0,0467351	0,0038307	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0007661	0,000000	0,000000	28,2731779
2-2,5	0,000000	0,000000	0,0099599	0,1716173	0,7914314	3,3082292	1,6502839	1,8571440	0,9415965	1,6257671	1,5537491	0,4849720	0,9369996	0,3371053	0,0697195	0,0084276	0,0459689	0,0053630	0,0007661	0,0015323	0,0053630	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	13,8059959
2,5-3	0,000000	0,000000	0,000000	0,0099599	0,0934701	0,6343710	0,7416317	0,8734093	0,3470653	0,5500946	0,6788076	0,2451675	0,4688829	0,2114570	0,0559288	0,0114922	0,0566950	0,0114922	0,000000	0,0022984	0,0015323	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	4,9937559
3-3,5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0030646	0,0896394	0,2275461	0,4045264	0,1034300	0,1164546	0,1685527	0,0628242	0,1831095	0,1202853	0,0367751	0,0137907	0,0497997	0,0022984	0,000000	0,0030646	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,5851612
3,5-4	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0015323	0,0107261	0,0436705	0,1379067	0,0222183	0,0390736	0,0459689	0,0214522	0,0566950	0,0942363	0,0199199	0,0045969	0,0375413	0,0022984	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,5378362
4-4,5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0022984	0,0045969	0,0252829	0,0245168	0,0183876	0,0145568	0,0061292	0,0237506	0,0260490	0,0061292	0,0022984	0,0168553	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,1708511
4,5-5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0168553	0,0137907	0,0061292	0,0022984	0,0038307	0,0122584	0,0114922	0,0022984	0,000000	0,0007661	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0697195
5-5,5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0045969	0,0007661	0,0015323	0,0007661	0,000000	0,0030646	0,0030646	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0137907
5,5-6	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0007661	0,0007661	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,0015323
																									Total %	100,000000

Figura 35. Matriz datos de oleaje Boya Gran Canaria. Eventos ocurridos en %. Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados por Puertos del Estado.

### 5.3 Modelo de tecnología de captación de energía del oleaje.

#### 5.3.1 Introducción.

En el presente apartado se va a describir el proceso de modelado de la tecnología undimotriz, en sus siglas en inglés “*Wave Energy Converter*” (*WEC*) seleccionada para la formación del parque de generación que se va a utilizar para la realización del estudio de la estabilidad de la frecuencia. El tipo de WEC junto con otras variables propias del parque de generación, influye en la potencia de salida a integrar en la red eléctrica débil. Por lo tanto, la selección y correcta modelización numérica del WEC es un factor importante a tener en cuenta a la hora de realizar estudios de estabilidad de red ante la integración de energía undimotriz.

Se ha seleccionado como tecnología de captación undimotriz a modelar el absorbedor puntual de dos cuerpos. Los absorbedores puntuales junto los OWC son los convertidores de energía del oleaje que actualmente están liderando las investigaciones y el desarrollo tecnológico de los WEC.

Entre las ventajas que estos dispositivos presentan destacan [118]:

- Dispositivo alejado de la costa: permite disponer de oleajes de mayor energía al poder ubicarse en alta mar. Debido a esto se puede obtener mayor energía al ser el oleaje más energético.
- El cuerpo móvil recibe la acción del oleaje: al ser un solo cuerpo el que percibe el movimiento del oleaje, es necesario menor cantidad de material reduciendo los costes de diseño y fabricación.
- El cuerpo móvil recibe la acción del oleaje: al ser un solo cuerpo el que percibe el movimiento del oleaje, es necesario menor cantidad de material reduciendo los costes de diseño y fabricación.



Figura 36. Convertidor Energía del Oleaje W1 en la costa de la isla de Gran Canaria. Fuente: WEDGE GLOBAL [18].

Esta tecnología de convertidor de energía undimotriz se corresponde a la utilizada en los proyectos de investigación teórica y aplicada por el grupo de Sistemas Eléctricos de Potencia del Centro de Investigaciones Ambientales y Energéticas (CIEMAT), en concreto dentro de los proyectos Undigen y Undigen+. Estos proyectos se realizaron en aguas próximas a la costa de la isla de Gran Canaria y se centraron en el desarrollo tecnológico y ensayos en mar de un convertidor de energía de olas, el absorbedor puntual W1 propiedad de la empresa de base tecnológica Wedge Global (Figura 36).

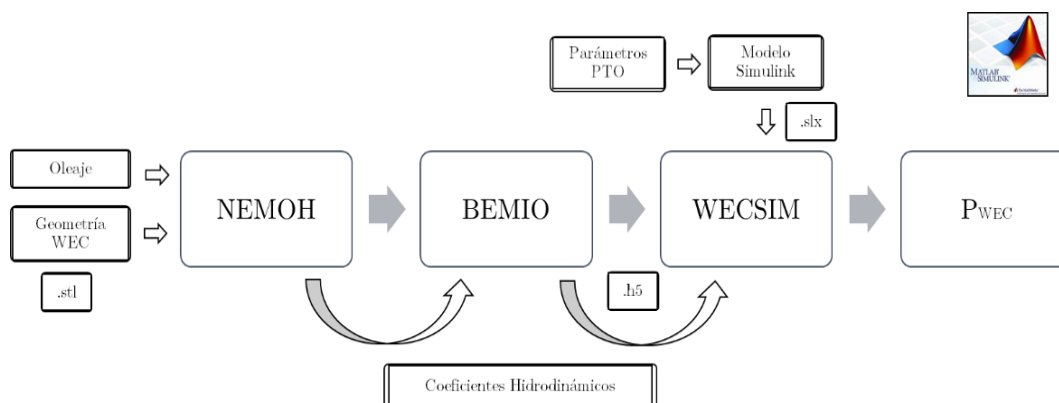


Figura 37. Esquema metodología cálculo  $P_{WEC}$ . Fuente: Elaboración propia.

Una vez seleccionada la tecnología de captación que mejor se adapte al recurso del oleaje y características de la localización a integrar se procede a realizar una descripción teórica de la misma y a la realización de su modelo mediante herramientas de modelado numérico con el objetivo de determinar la potencia extraída ( $P_{WEC}$ ) de la ola por la tecnología de captación.

Para el cálculo de  $P_{WEC}$  en primer lugar hay que tener en cuenta que los WECs son cuerpos sumergidos en un fluido (el agua del mar) y que por lo tanto existen interacciones hidrodinámicas cuerpo-fluido. Estas consideraciones hidrodinámicas tienen una consecuencia directa en la potencia final extraída por la tecnología. En el apartado dedicado a la revisión bibliográfica se resumieron algunos de los trabajos de investigación realizados en este ámbito de estudio. Varios de estos estudios han sido realizados mediante el uso de la herramienta computacional NEMOH. La herramienta computacional NEMOH realiza el cálculo de los coeficientes hidrodinámicos de los WECs por medio de la teoría de los elementos de frontera (BEM). Posteriormente estos coeficientes hidrodinámicos son transformados por la herramienta computacional BEMIO en un formato de lectura adecuado (archivos .h5) para que actúen de variables de entrada a otra herramienta computacional el WEC-Sim donde finalmente se realiza, entre otros cálculos, el cálculo de la  $P_{WEC}$  creando un modelo de la tecnología seleccionada mediante el entorno Simulink de Matlab (Figura 37).

5.3.2 Tecnología de captación seleccionada: el absorbedor puntual de dos cuerpos.

Los absorbedores puntuales están constituidos por un cuerpo flotante, un PTO y un cuerpo de reacción sumergido. El cuerpo de reacción puede tener inercia infinita si lo anclamos al fondo marino o finita si lo lastramos con una masa adicional. La interacción entre el cuerpo flotante y la ola da lugar al movimiento vertical del cuerpo flotante. Ante este movimiento el PTO se mueve a su vez verticalmente y ejerce una fuerza de reacción contra el cuerpo de reacción para extraer la energía proveniente de la ola.

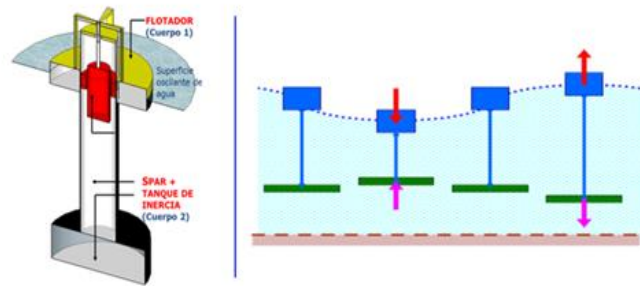


Figura 38. A) Partes de un absorbedor puntual. B) Desplazamiento de un absorbedor puntual respecto de la ola.

Existen varios tipos de absorbedores puntuales en función de si el cuerpo de reacción tiene inercia infinita o finita. Si presenta inercia infinita se tendrá un absorbedor puntual de un cuerpo y si presenta potencia infinita un absorbedor puntual de dos cuerpos.

El absorbedor puntual de dos cuerpos, tecnología seleccionada para su modelado dentro de esta tesis doctoral, es de las dos opciones descritas anteriormente la más recomendable ya que permite desplazar el dispositivo a aguas profundas en las que están presentes los oleajes más energéticos.

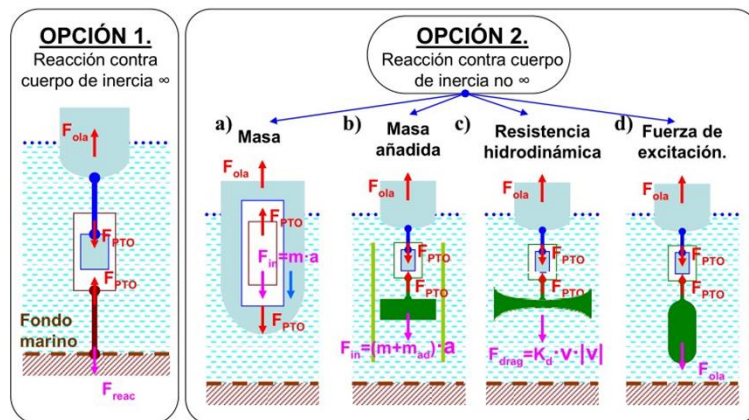


Figura 39. Fuerzas que actúan en un absorbedor puntual de dos cuerpos con cuerpo de reacción con inercia infinita (OPCIÓN 1) e inercia finita (OPCIÓN 2).

Los elementos que definen el comportamiento de un absorbedor puntual son:

- La masa del cuerpo oscilante ( $m$ ).
- Una constante elástica ( $S$ ).
- La amortiguación o fricción del sistema ( $R$ ).

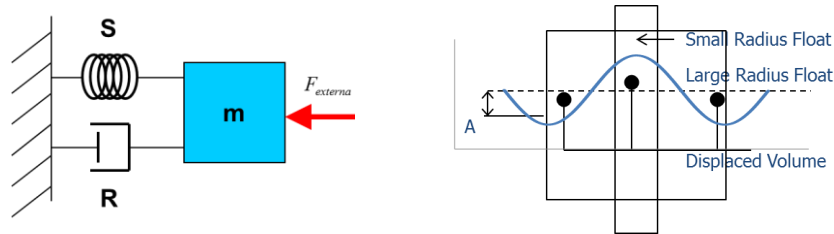


Figura 40. Elementos que definen el comportamiento de un absorbedor puntual de dos cuerpos.

Las seis ecuaciones que describen el comportamiento de un WEC corresponden a los seis grados de libertad que poseen estos cuerpos flotantes (Figura 41).

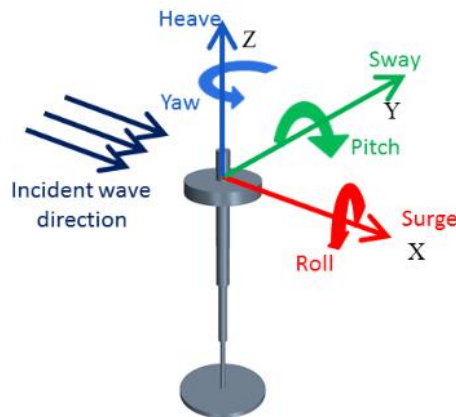


Figura 41. Grados de libertad correspondientes a un WEC (absorbedor puntual) [114].

El eje  $X$  positivo define un rumbo de ángulo de ola de cero (por ejemplo, una ola que se propaga a lo largo de una dirección de grado cero se mueve en la dirección  $+X$ ). El eje  $+Z$  está en la dirección vertical hacia arriba, y la dirección  $+Y$  está definida por la regla de la mano derecha. En la Figura 41, Surge ( $x$ ), Sway ( $y$ ) y Heave ( $z$ ) corresponden a la primera, segunda y tercera posición respectivamente, Roll ( $R_x$ ), Pitch ( $R_y$ ) y Yaw ( $R_z$ ) corresponden a la cuarta, quinta y sexta posición respectivamente.



Por otro lado, la ecuación general que define el comportamiento de un cuerpo flotante es (Ecuación 7):

$$m_b \ddot{s}(t) + Ss(t) = F_w(t) + F_f(t) + F_u(t) + F_c(t) + F_m$$

*Ecuación 7. Ecuación general para un cuerpo flotante.*

En donde:

$\ddot{s}(t)$	Aceleración del cuerpo.
$s(t)$	Desplazamiento del cuerpo.
$S$	Coficiente de oposición al desplazamiento.
$F_w(t)$	Fuerza de la ola sobre el cuerpo, compuesta a su vez por radiación y excitación.
$F_f(t)$	Fuerza de fricción mecánica y viscosa sobre el cuerpo.
$F_u(t)$	Fuerza entre los cuerpos; es la fuerza del dispositivo extractor de energía, PTO (Power Take Off).
$F_c(t)$	Fuerza de sistemas de fin de carrera (protección ante movimientos extremos).
$F_m$	Fuerza de flotación de Arquímedes

*Tabla 11. Términos de la ecuación general para un cuerpo flotante [114].*

La Ecuación 7 es la aplicación de la 2ª Ley de Newton a un cuerpo flotante y se conoce como la ecuación de Cummins.

En base a la teoría lineal de las olas la mecánica de la ola se puede definir como una superposición de fenómenos. Por lo tanto, la fuerza de una ola se puede descomponer en dos fuerzas: fuerza de excitación (natural de la ola) y la fuerza de radiación (producida por las ondas generadas por el movimiento oscilatorio del cuerpo flotante).

$$F_w(t) = F_e(t) + F_r(t)$$

*Ecuación 8. Ecuación que describe la mecánica de una ola.*

A su vez la fuerza de excitación ( $F_e$ ):

$$F_e(t) = f(t) * \eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau) f(t - \tau) d\tau$$

*Ecuación 9. Ecuación fuerza de excitación.*

Y la fuerza de radiación ( $F_r$ ):

$$F_r(t) = -m_r(\infty)\dot{u}(t) - k(t) * u(t) = -m_r(\infty)\dot{u}(t) - \int_{-\infty}^{\infty} k(t - \tau)u(\tau) d\tau$$

*Ecuación 10. Ecuación fuerza de radiación.*

A la ecuación de la  $F_r$  se le añaden los términos correspondientes a la influencia de los distintos cuerpos cercanos que también generan ondas de radiación, quedando finalmente la Ecuación 7 transformada en Ecuación 11:

$$[m_b + m_{r\infty}(\omega)]\ddot{z}(t) + \int_{-\infty}^t k(t - \tau)\dot{z}(\tau)d\tau + Sz(t) - F_m(t) - F_c(t) - F_f(t) - F_u(t) = F_e(t)$$

*Ecuación 11. Ecuación general para un cuerpo flotante en el dominio del tiempo.*

Expresada en el dominio de la frecuencia Ecuación 12:

$$[m_b + m_r(\omega)]j\omega v + B(\omega)v + S\frac{1}{j\omega} - F_m(\omega) - F_c(\omega) - F_f(\omega) - F_u(\omega) = F_e(\omega)$$

*Ecuación 12. Ecuación general para un cuerpo flotante en el dominio de la frecuencia.*

Como se puede observar de ambas ecuaciones (Ecuación 11-Ecuación 12) la función de entrada sería la fuerza de excitación y la función de salida correspondería al desplazamiento y la velocidad o la aceleración del cuerpo.

Particularizando la ecuación general para un cuerpo flotante (Ecuación 7), se obtiene la ecuación que definen las fuerzas que actúan sobre un absorbedor puntual de dos cuerpos (Ecuación 13). Las siguientes consideraciones se han tenido en cuenta: para su simplificación se ha considerado el flotador cilíndrico, la masa total del cuerpo es la masa del flotador,  $M_f$ , más la denominada *masa añadida*,  $M_w$ , que es la masa de agua que arrastra el flotador en su movimiento y se ha supuesto únicamente el movimiento vertical del cuerpo.

$$F_w + \left( K_x \int v_f dt + K_v v_f + K_a \frac{dv_f}{dt} \right) - K_B \int v_f dt - K_R(\omega)v_f - (M_f + M_w(\omega))\frac{dv_f}{dt} = 0$$

*Ecuación 13. Ecuación general que define el comportamiento de un absorbedor puntual de dos cuerpos.*

Las fuerzas obtenidas se pueden considerar lineales y por simplicidad a la hora de cálculo se suele trabajar con ellas en el dominio de la frecuencia para una resolución inicial de las mismas.

El problema se puede plantear desde la dimensión la teoría de circuitos (siempre que nos encontremos dentro de la teoría lineal). De esta manera se plantea la analogía entre los parámetros mecánicos y eléctricos [119]:

- Fuerza equivale al potencial eléctrico.
- La velocidad a la intensidad.
- Los coeficientes de fricción son las resistencias.
- La masa y masa añadida equivalen a las inductancias de las bobinas.
- La constante de muelle o la constante de flotación de Arquímedes equivalen a la inversa de la capacitancia de condensadores.



En la Figura 42 se aplican las analogías eléctricas descritas y se representa el circuito eléctrico equivalente para el absorbedor puntual de dos cuerpos y sus simplificaciones.

Como se describió en el capítulo de la tesis dedicado al marco teórico existen diferentes sistemas de conversión (PTO) para la conversión de la energía extraída de la ola. En el caso de estudio que nos ocupa el modelo de PTO seleccionado consiste en un sistema de accionamiento directo cuyo generador eléctrico es un generador lineal de reluctancia conmutada, evitando el uso intermedio de sistemas hidráulicos.

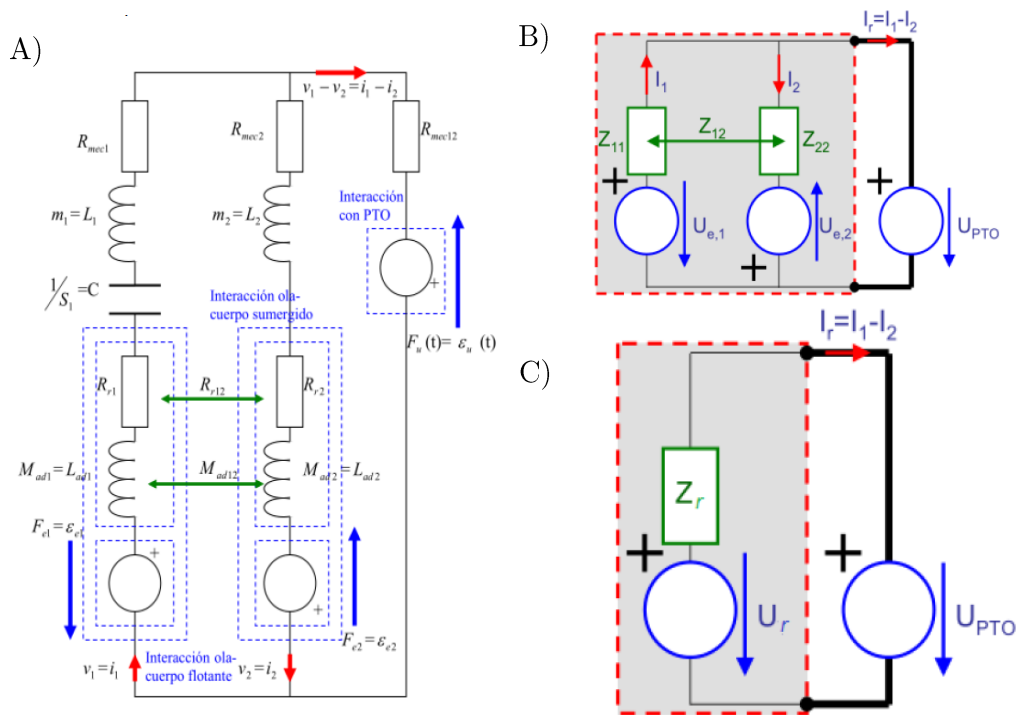


Figura 42. A) Circuito eléctrico equivalente para un absorbedor puntual de dos cuerpos. B) Circuito eléctrico simplificado. C) Circuito equivalente simplificado representando la fuerza y la velocidad relativa entre los cuerpos. [119].

El generador eléctrico lineal de reluctancia conmutada pertenece dentro de la clasificación de las máquinas eléctricas a las asíncronas. Su principio de funcionamiento se base en el movimiento de desplazamiento del rotor de la posición natural de menor de reluctancia, generando el campo magnético en los bobinados produciendo el campo eléctrico.

Como diseño de generador lineal de reluctancia conmutada se presenta una máquina compuesta por varios módulos idénticos de 6 polos en el rotor y 4 en el estator.

Se realizan las siguientes consideraciones en relación con el generador lineal de reluctancia conmutada [119]:

- Pérdidas magnéticas despreciables.
- Interferencias dimensionales entre el movimiento mecánico y eléctrico son despreciables.

- Pérdidas mecánicas despreciables.
- La fuerza ejercida o frenada por la máquina es proporcional a la corriente circulante. ( $F_{PTO} = k \cdot I$ ).
- Se considera que la máquina actúa en régimen permanente.

Partiendo de las consideraciones se plantean las siguientes ecuaciones para establecer la potencia eléctrica para el generador eléctrico lineal:

$$P_{eléctrica} = P_{mecánica} - P_{pérdidas}$$

$$P_{mecánica} = F_{PTO} \cdot v_{PTO}$$

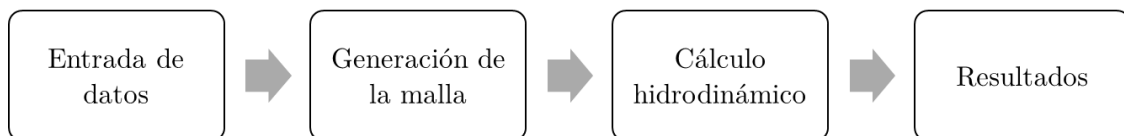
$$P_{pérdidas} = R_{cu} \cdot I_{PTO}^2 = \frac{R_{cu}}{k^2} \cdot F_{PTO}^2 = K_{PTO} \cdot F_{PTO}^2$$

$$P_{eléctrica} = F_{PTO} \cdot v_{PTO} - K_{PTO} \cdot F_{PTO}^2$$

*Ecuación 14. Ecuaciones que definen la potencia eléctrica en función de los parámetros del PTO.*

### 5.3.3 Herramienta computacional NEMOH.

Como se describió en el apartado dedicado a la metodología de la tesis NEMOH es una herramienta computacional [113] de código abierto que se ejecuta en el entorno Matlab y que ha sido desarrollada por los grupos de investigación de la École de Nantes. Su objetivo es el de calcular las fuerzas y coeficientes hidrodinámicos que determinan el comportamiento hidrodinámico entre el WEC y el fluido (agua de mar).



*Figura 43. Diagrama secuencia funcionamiento NEMOH. Fuente: elaboración propia.*

Como resultado de la aplicación del NEMOH se obtiene la caracterización hidrodinámica del WEC en base a su geometría y las características del oleaje.

A continuación, se describe brevemente el funcionamiento básico del NEMOH.

En primer lugar, se procede a descargar el código abierto en donde se encuentran las dos carpetas principales: Mesh donde se encuentra el ejecutable del mallado y Nemoh donde se encuentran los de los cálculos BEM. También hay una serie de archivos .m que funcionan como llamada a los ejecutables y que permiten gestionar los datos de entrada y salida. A destacar:

- axiMesh.m: genera mallas para geometría axil simétricas.
- Mesh.m: genera mallas para geometrías más generales, pero con al menos un eje de simetría.
- Nemoh.m: se utiliza para el cálculo BEM.

También existen dos archivos de formato de texto:

- Mesh.cal: archivo donde se resume la información del último mallado ejecutado (n° de nodos, centro de gravedad).
- ID.dat: este archivo es importante porque será el archivo referencia para los ejecutables de NEMOH.

Una vez localizado el código se procede a generar la malla para el WEC que se quiera modelizar.

Se utiliza el archivo axiMesh, para geometrías de cuerpo que son axil simétricas en el eje vertical. Para geometrías más generales (que deben tener igualmente un eje de simetría) se utiliza Mesh.m. Se va a realizar el procedimiento de mallado ejecutando axiMesh ya que es el mismo para ambos ejecutables con la diferencia de los datos de entrada.

Los datos de entrada para axiMesh.m son el n° de puntos que definen el cuerpo junto con las coordenadas cilíndricas de cada uno de esos puntos. Se toma como línea de flotación por defecto 0.

Al ejecutar axiMesh.m se nos preguntará por el número de divisiones angulares que se quieren hacer en el cuerpo. Este dato se usa para estimar cuántos nodos y en cuántos paneles se puede particionar el cuerpo. Se nos solicitará un nombre de carpeta para nuestro proyecto en el cual se recopilarán los resultados obtenidos: mesh(mallado), results (donde se guardan los archivos de salida para la ejecución de Nemoh.m). También se generará la carpeta Nemoh.cal. Finalmente se introduce el centro de gravedad y el número de paneles que deseamos crear obteniendo como resultado final la malla con los paneles y los vectores normales definidos.

Como archivos de salida se obtendrán:

- Axisym.dat: contiene la estructura de la malla sobre la que NEMOH hará los cálculos.
- Hydrostatics.dat: contiene las coordenadas del centro de flotación y el desplazamiento de la línea de flotación.
- KH.dat: almacena la matriz de respuesta hidrodinámica del cuerpo.
- CG\_hull.dat: coordenadas del centro de gravedad del cuerpo.
- Inertia\_hull.dat: matriz de inercia del cuerpo.
- Axisym\_info.dat: contiene el número de punto y de paneles de la malla.

En el caso de usar Mesh.m que permite que se realicen mallados de manera más general tendremos como datos de entrada: n° de cuerpos, número de paneles que definen al cuerpo, coordenadas de las esquinas (en cartesianas), centro de gravedad, n° de paneles. A diferencia de axiMesh.m solo definimos la mitad de nuestro cuerpo en vez del cuerpo completo y se permite el mallado de dos cuerpos a la vez, de utilidad para cuerpos flotantes compuestos por varias piezas.

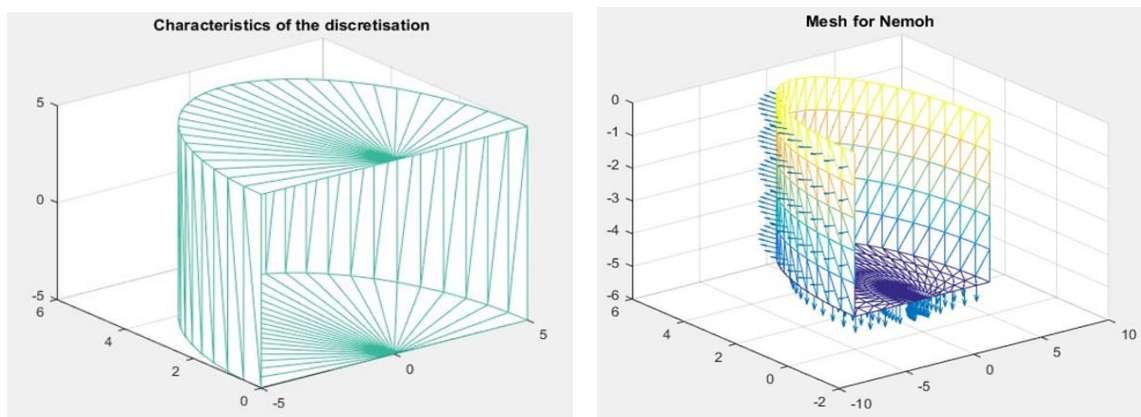


Figura 44. División angular y mallado de un cuerpo mediante NEMOH. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se ha obtenido el mallado del cuerpo se procede a realizar el cálculo hidrodinámico.

El cálculo hidrodinámico se realiza partiendo de la definición del mar, estado de mar y del cuerpo flotante. Se obtienen como resultado las fuerzas involucradas y los coeficientes asociados a ellas.

Como archivos de entrada:

- ID.data: archivo que contiene los datos referentes al cuerpo mallado
- Archivo de malla axisym.dat o mesh.dat: contiene las coordenadas de los nodos de la malla, los paneles que forman y sus conexiones.
- Nemoh.cal: dentro de este archivo se encuentran los datos referentes al
  - *Enviroment*: características del mar.
  - *Cuerpos*: número de cuerpos que intervienen en el problema, y por cada uno se identifica el archivo de mallado que lo define, también se define el número de grados de libertad y se identifica cuáles son (1 de translación y 2 de rotación), así como las fuerzas a calcular (como máximo 6, una para cada grado de libertad, fuerzas y momentos, respectivamente).
  - *Load cases to solve*: donde se define el array de frecuencias y direcciones, caracterizando una matriz de casos a resolver. Se representa las características del oleaje.
  - *Post processing*: Nemoh ofrece opciones de cálculo extra.

La hoja Nemoh.m contiene el código que permite llamar a los ejecutables sin necesidad de modificar y adaptar el formato de datos intermedios. Se introducen como datos de entrada:

- Vector “w”. Contiene las frecuencias del oleaje en rad/s.
- Vector “dir”. Contiene las direcciones del oleaje en grados.
- Depth. Es la profundidad del mar. Por defecto el 0 representa la profundidad infinita, una aproximación que se ajusta bastante a la mayoría de los casos de objetos flotantes de interés ingenieril.

Los tres ejecutables (preProcessor.exe, solver.exe, postProcessor.exe) que componen Nemoh serán llamados de manera secuencial, y según avance el cálculo se generarán los archivos que contienen información sobre la dinámica del problema.

Como salida obtendremos tres matrices que representan los coeficientes hidrodinámicos (matriz de masa, matriz de radiación y fuerzas de excitación) en el dominio de la frecuencia. Estos valores de salida serán guardados en archivos .dat en la subcarpeta “results”.

#### 5.3.3.1 Aplicación de NEMOH al absorbedor puntual de dos cuerpos.

En el presente apartado se procede a la aplicación de la herramienta computacional NEMOH a la tecnología de convertidor seleccionada para el caso de estudio en la tesis doctoral, el absorbedor puntual de dos cuerpos.

En primer lugar y haciendo uso de la herramienta computacional NEMOH, se realizó el mallado del cuerpo flotante a partir de su geometría. Se ha utilizado el código Mesh.m ya que el absorbedor puntual de dos cuerpos presenta un eje de simetría (eje Y). Se han introducido las características de refinamiento para la generación de la malla. Como resultado se obtuvo la malla representada en la Figura 45, en donde se observan claramente los dos cuerpos que forman parte del cuerpo flotante, así como la malla con los paneles y los vectores normales definidos.

También se ha realizado el cálculo de las constantes hidrodinámicas del cuerpo. Realizado el mallado se ejecuta el programa de cálculo basado en BEM. En este paso se incluyen los datos relativos al oleaje. Se realiza la simulación de los casos hidrodinámicos que se quieran analizar obteniendo finalmente las fuerzas y coeficientes (Figura 46), en función de la frecuencia de las olas que afectan al cuerpo flotante.

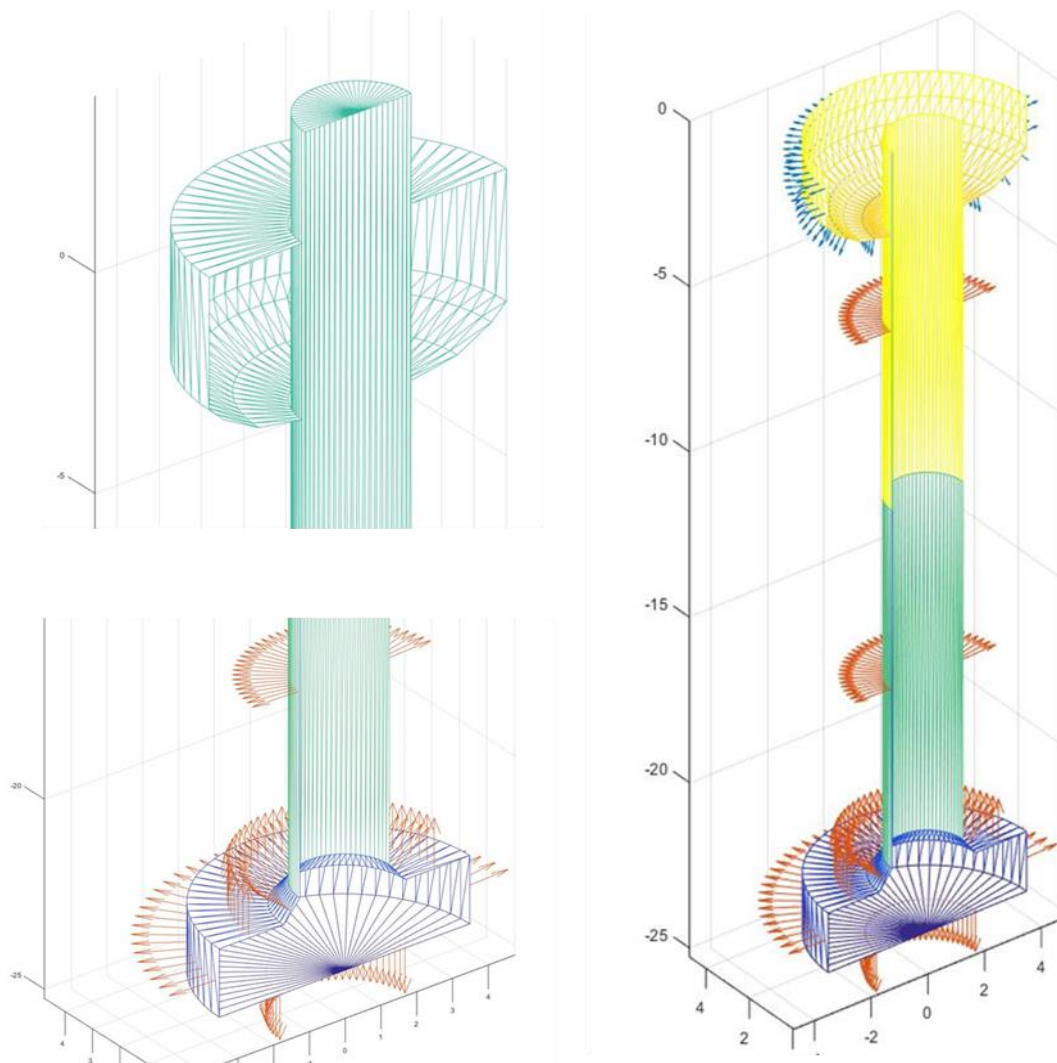


Figura 45. Resultado proceso malla absorbador puntual de dos cuerpos a partir de NEMOH.

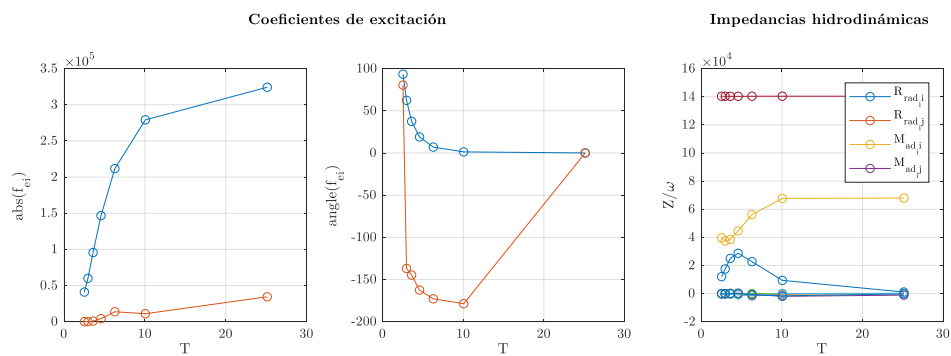


Figura 46. Coeficientes hidrodinámicos para el absorbador puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.4 Herramienta computacional BEMIO.

La herramienta computacional BEMIO tiene como objetivo transformar los coeficientes hidrodinámicos calculados mediante NEMOH a un lenguaje de código (archivos .h5) que pueda ser identificado y leído correctamente por la herramienta computacional WEC-Sim.

Este código de transformación es proporcionado por los propios creadores de WECSIM.

Se extraen los datos en forma de una estructura (struct en el lenguaje Matlab) que es llamada por BEMIO “*hydro*”, la cual contiene la función `hydro = Read_NEMOH(hydro, filedir)`. La salida de los datos se realiza mediante la función `hydro = Normalize(hydro)`. El archivo `hydro` es un struct que condensa toda la información del problema hidrodinámico resuelto por elementos finitos.

Ejecutando el código se procede a la generación del archivo .h5 mediante:

- `Write_H5(hydro)`. Transforma el struct `hydro` en un archivo .h5 que puede leer WEC-Sim.
- `Plot_BEMIO(hydro)`. Grafica el resultado para distintas frecuencias de la masa añadida, el coeficiente de damping, la fuerza de radiación, la fuerza de excitación en módulo y fase, y la fuerza de excitación.

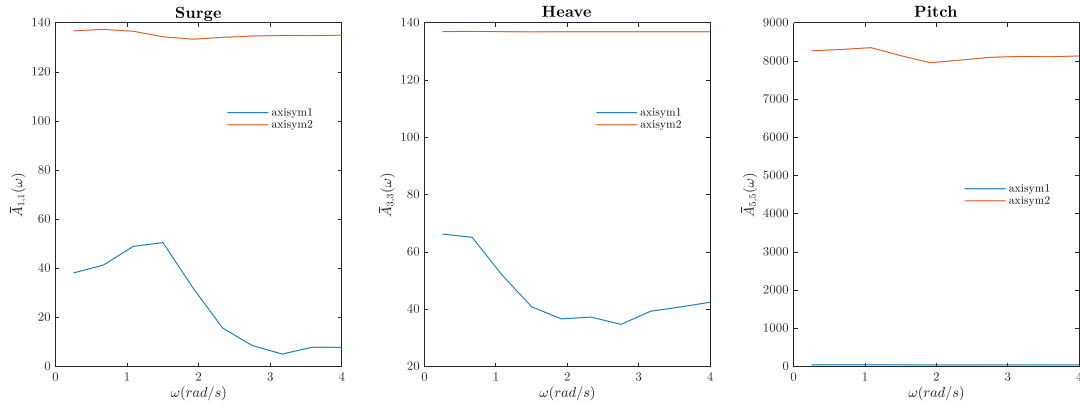
#### 5.3.4.1 Aplicación de BEMIO al absorbedor puntual de dos cuerpos.

En el presente apartado se ha realizado la ejecución de la herramienta computacional BEMIO. Los archivos obtenidos en NEMOH para el absorbedor puntual de dos cuerpos no pueden ser leídos por el WEC-Sim por esta razón se debe hacer uso de la herramienta computacional BEMIO que se encarga de la transformación de los archivos solución obtenidos por el NEMOH en un archivo de lectura .h5 cuyo formato de lectura es aceptado por WEC-Sim.

Se han obtenido los archivos .h5 y las gráficas resultado para distintas frecuencias de la masa añadida, el coeficiente de damping, la fuerza de radiación, la fuerza de excitación en módulo y fase, y la fuerza de excitación.

A continuación, y para facilitar la comprensión de los resultados, se exponen las gráficas resultado de la ejecución de BEMIO para el absorbedor puntual de dos cuerpos (ver Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52).

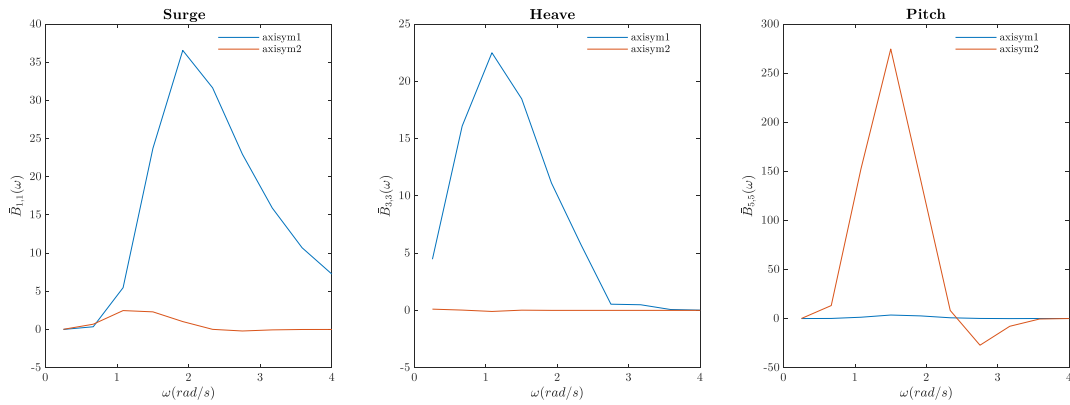
$$\text{Normalized Added Mass: } \bar{A}_{i,j}(\omega) = \frac{A_{i,j}(\omega)}{\rho}$$



- Notes:
- $\bar{A}_{i,j}(\omega)$  should tend towards a constant,  $A_{s,j}$ , within the specified  $\omega$  range.
  - Only  $\bar{A}_{i,j}(\omega)$  for the surge, heave, and pitch DOFs are plotted here. If another DOF is significant to the system, that  $\bar{A}_{i,j}(\omega)$  should also be plotted and verified before proceeding.

Figura 47. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente de masa añadida del absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

$$\text{Normalized Radiation Damping: } \bar{B}_{i,j}(\omega) = \frac{B_{i,j}(\omega)}{\rho\omega}$$

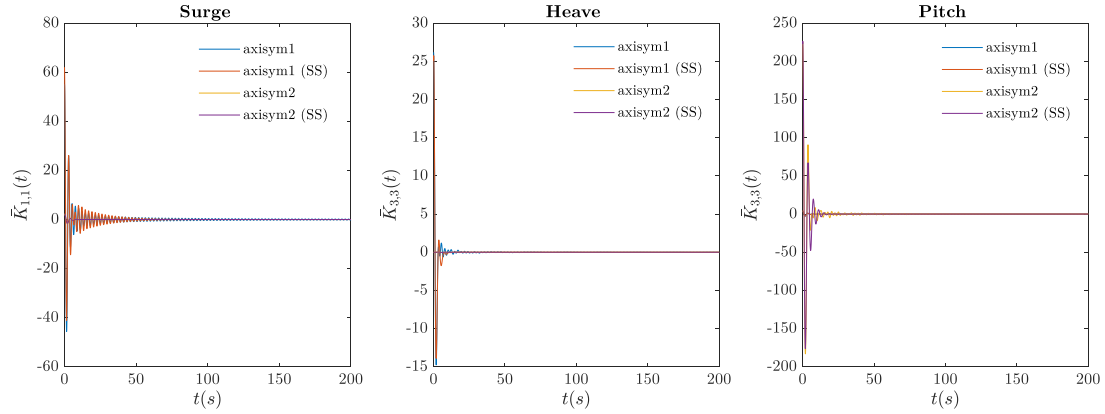


- Notes:
- $\bar{B}_{i,j}(\omega)$  should tend towards zero within the specified  $\omega$  range.
  - Only  $\bar{B}_{i,j}(\omega)$  for the surge, heave, and pitch DOFs are plotted here. If another DOF is significant to the system that  $\bar{B}_{i,j}(\omega)$  should also be plotted and verified before proceeding.

Figura 48. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente radiación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.



$$\text{Normalized Radiation Impulse Response Functions: } \bar{K}_{i,j}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{B_{i,j}(\omega)}{\rho} \cos(\omega t) d\omega$$



- Notes:
- The IRF should tend towards zero within the specified timeframe. If it does not, attempt to correct this by adjusting the  $\omega$  and  $t$  range and/or step size used in the IRF calculation.
  - Only the IRFs for the surge, heave, and pitch DOFs are plotted here. If another DOF is significant to the system, that IRF should also be plotted and verified before proceeding.

Figura 49. Resultado de la ejecución de BEMIO para el coeficiente de respuesta impulso radiación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

$$\text{Normalized Excitation Force Magnitude: } \bar{X}_i(\omega, \beta) = \frac{X_i(\omega, \beta)}{\rho g}$$

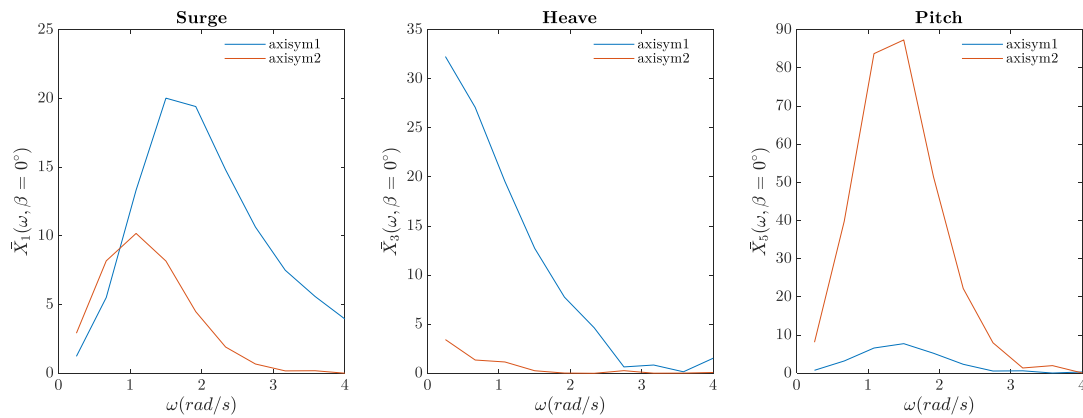


Figura 50. Resultado de la ejecución de BEMIO coeficiente fuerza de excitación (módulo) para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

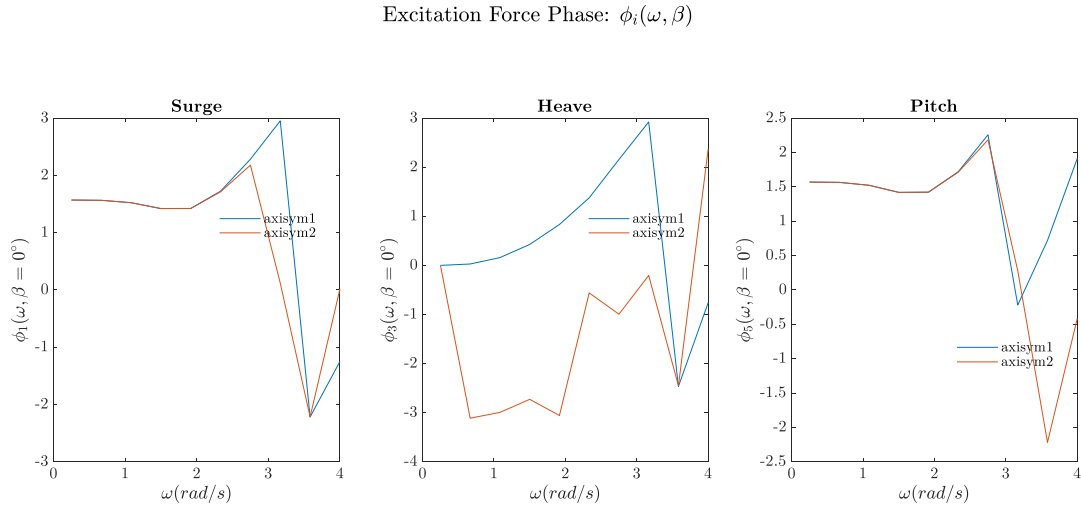
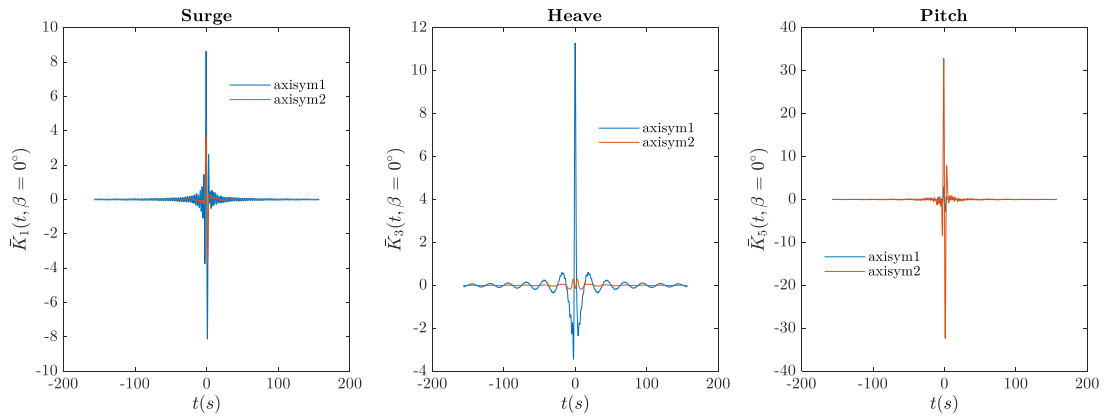


Figura 51. Resultado de la ejecución de BEMIO coeficiente fuerza de excitación (fase) para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

$$\text{Normalized Excitation Impulse Response Functions: } \bar{K}_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X_i(\omega, \beta) e^{i\omega t}}{\rho g} d\omega$$



Notes:

- The IRF should tend towards zero within the specified timeframe. If it does not, attempt to correct this by adjusting the  $\omega$  and  $t$  range and/or step size used in the IRF calculation.
- Only the IRFs for the first wave heading, surge, heave, and pitch DOFs are plotted here. If another wave heading or DOF is significant to the system, that IRF should also be plotted and verified before proceeding.

Figura 52. Resultado de la ejecución de BEMIO función respuesta impulso para el coeficiente de excitación para el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.5 Herramienta computacional WEC-SIM.

Wave Energy Converter Simulator (WEC-Sim) es una herramienta computacional de código abierto que se ejecuta dentro del entorno Matlab-Simulink. Su objetivo es el de modelar WECs por medio de una librería de bloques que es incorporada a Simulink. Esta herramienta computacional ha sido creada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) con la colaboración del Sandia National Laboratories pertenecientes al Departamento de Energía del Gobierno de Estados Unidos (EE. UU.).

WEC-Sim resuelve en el dominio del tiempo las seis ecuaciones que describen el comportamiento del WEC que corresponden a los seis grados de libertad que poseen estos cuerpos flotantes (Figura 41), dando solución a la ecuación general en el dominio del tiempo para un cuerpo flotante (Ecuación 12).

Los términos hidrodinámicos se habrán calculado previamente mediante NEMOH o cualquier otra herramienta computacional.

WEC-Sim permite completar el modelo mediante la inclusión de otras variables como son los espectros del oleaje, el modelado del PTO, los amarres o moorings del WEC (fuerzas que aparecen sobre la catenaria submarina al incidir la ola sobre ella).

A continuación, se va a hacer un breve resumen del procedimiento para su ejecución.

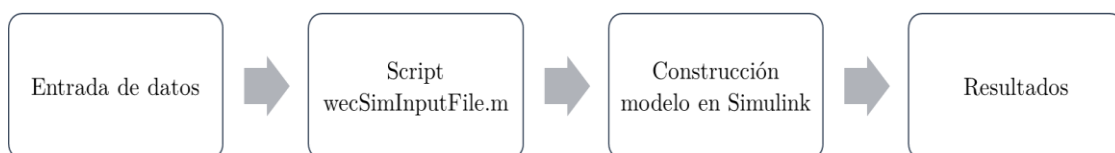


Figura 53. Diagrama secuencia funcionamiento WEC-Sim.

La entrada de datos se realizará mediante la descarga de los archivos proporcionados en la página web de WEC-Sim [114] y su integración en el entorno Matlab-Simulink en donde se cargarán las librerías específicas para la generación del modelo.

Posteriormente se hará uso del script `wecSimInputFile.m`. Este script no es el archivo `.m` de ejecución general del WEC-Sim (`wecSim.m`), es un archivo `.m` en el cual se almacenan de forma ordenada los datos del caso que queremos ejecutar.

Otro aspecto de carácter importante a considerar es que dentro de WEC-Sim los objetos son definidos por medio de “clases”. Las clases son “plantillas” de structs de Matlab que representan a los objetos o elementos que intervienen en el sistema. Las clases

correspondientes a los nuevos bloques añadidos en Simulink sirven para adjudicarles sus propiedades.

Las clases que se definen dentro del `wecSimInputFile.m` son:

- `simulationClass`. Recoge la información relativa a la simulación.
- `waveClass`. Contiene la información relativa a los parámetros de la ola. Tipo de oleaje con su  $H_s$  y  $T_p$ . Si el oleaje es regular o irregular.
- `bodyClass`. Define las propiedades de los cuerpos flotantes. Al declarar esta clase es fundamental introducir como input el archivo `.h5` generado por BEMIO.
- `constraintClass`. Se definen las relaciones entre los cuerpos. Cada bloque representa una determinada restricción de los grados de libertad de un cuerpo con respecto a otro.
- `ptoClass`. Se recuerda que el PTO representa el dispositivo que extrae potencia del movimiento relativo entre dos cuerpos. En el circuito de Simulink se conectan los dos cuerpos entre los que existe el movimiento relativo del que se extrae la energía.
- `mooringClass`. Si se declara la existencia de amarres para poder simularlos.
- `responseClass`. Esta clase es la única que no tiene que ser inicializada porque no contiene valores de entrada, si no solo resultados. El struct lo crea automáticamente el programa, con el nombre de output, y en él se pueden consultar los resultados de la simulación.

Definidas las clases dentro del script `wecSimInputFile.m`, se procede a la construcción del modelo en Simulink. Se construye en primer lugar el circuito mecánico donde se realizará la simulación. Para crear el modelo mecánico se hará uso de los bloques (body elements, PTOs, constraints) que se encuentran en la librería de Simulink de WEC-Sim. La simulación del modelo se realiza desde `wecSimInputFile.m`, y no desde Simulink.

Para la ejecución final de la simulación se utilizará el script `wecSim.m`. El archivo `wecSimInputFile.m` contiene todos los datos y archivos necesarios para la simulación. Para ello se ha tenido que generar antes el archivo `.h5` de cada cuerpo, el modelo de Simulink equivalente, el archivo geométrico, y definir las variables del oleaje, del PTO y de la simulación. Procedemos a ejecutar y observamos que se crean los struct correspondientes.

Como resultado final de la ejecución del WEC-Sim se obtiene entre otros parámetros de interés la potencia generada por el modelo de WEC ( $P_{WEC}$ ).

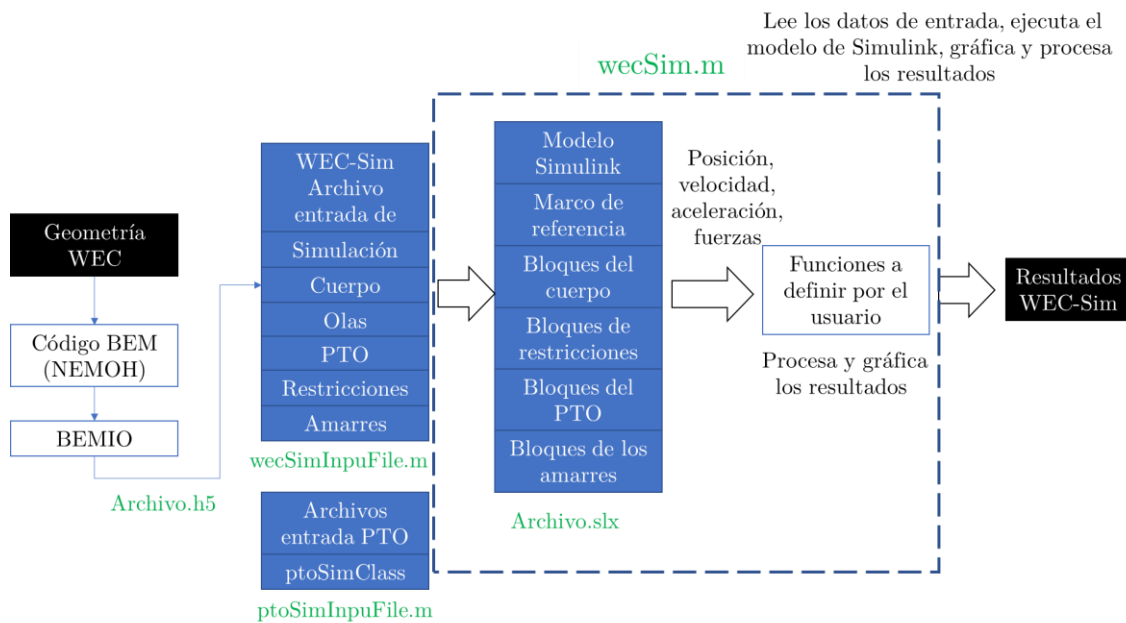


Figura 54. Diagrama de flujo de funcionamiento del WEC-Sim. Fuente: elaboración propia a partir de [114].

### 5.3.5.1 Aplicación de WEC-Sim al absorbedor puntual de dos cuerpos.

Una vez obtenidos los archivos entrada al WEC-Sim se procede al modelado mediante el entorno Simulink de Matlab del WEC (Figura 55), teniendo en cuenta las características propias del cuerpo, en especial las relativas a su PTO.

En el archivo wecSimInputFile.m se introducen manualmente las variables de ejecución del problema.

Para el caso de simulación para el absorbedor puntual de dos cuerpos se ha hecho uso dentro del archivo wecSimInputFile.m de las clases relativas a los parámetros de simulación, la relativa al recurso undimotriz, las propiedades del cuerpo y PTO.

Una vez establecidas las variables de entrada para el archivo wecSimInputFile.m se procedió al desarrollo del modelo de bloques Simulink para el absorbedor puntual de dos cuerpos, creando los bloques específicos (entradas de variables propias, control PTO) propios de este tipo de absorbedor puntual (ver Figura 55).

Finalmente se procede a la simulación del sistema conjunto ejecutando el archivo wecSim.m (ver Figura 54).

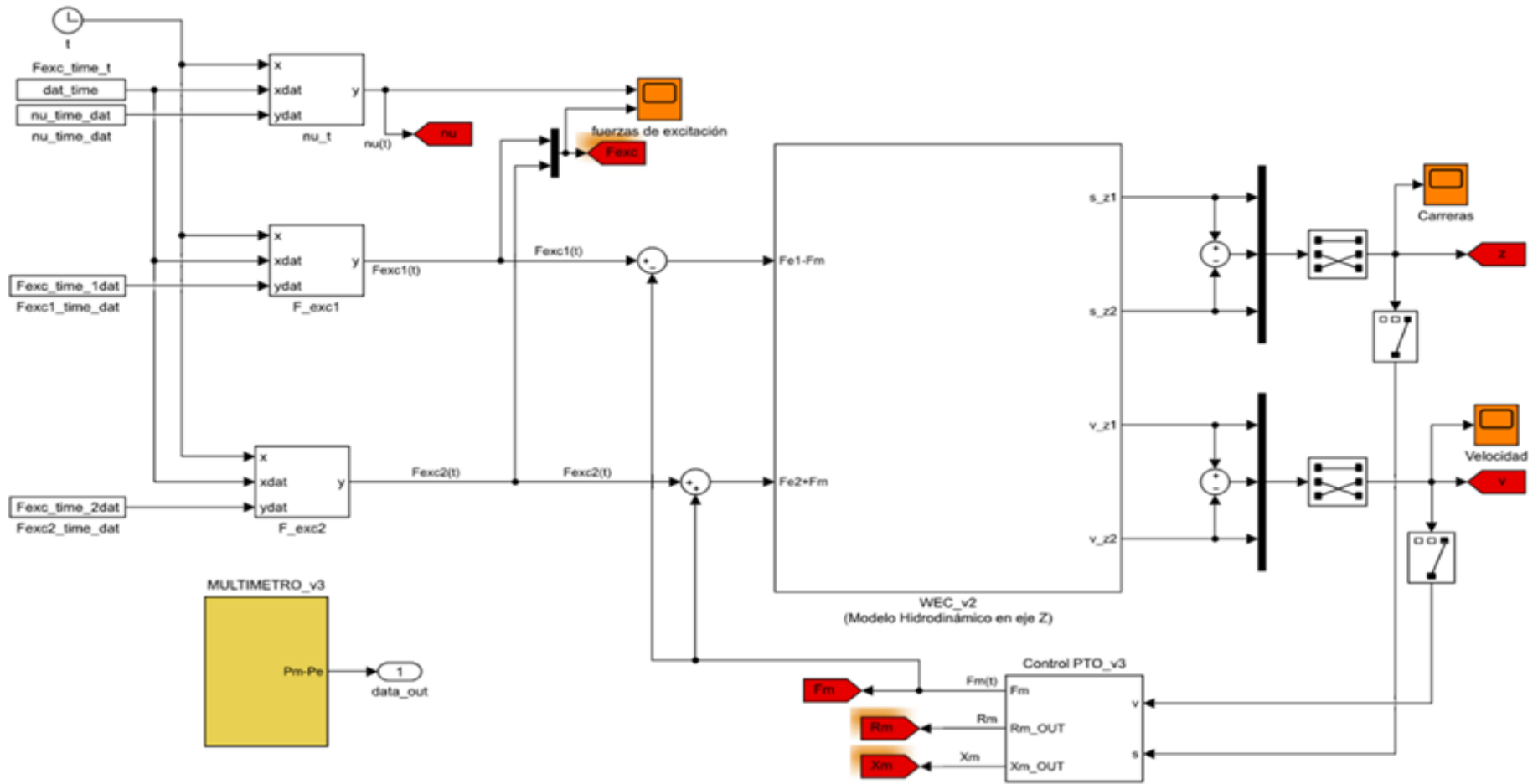


Figura 55. Modelo Simulink Absorbedor puntual de dos cuerpos para su ejecución en WEC-Sim.

## 5. Desarrollo de Modelos

Como resultado de la ejecución de WEC-Sim se han obtenido como resultado la fuerza del PTO ( $F_{PTO}$ ) (ver Figura 56) y la velocidad del PTO ( $v_{PTO}$ ), y por la tanto la  $P_{mecánica}$  para el absorbedor puntual de dos cuerpos ( $P_{mecánica} = F_{PTO} \cdot v_{PTO}$ ) (ver Figura 56 ). Si a este valor de  $P_{mecánica}$  le restamos las pérdidas obtendremos finalmente la  $P_{eléctrica}$  para el absorbedor puntual de dos cuerpos (ver Ecuación 14, Figura 56, Figura 57).

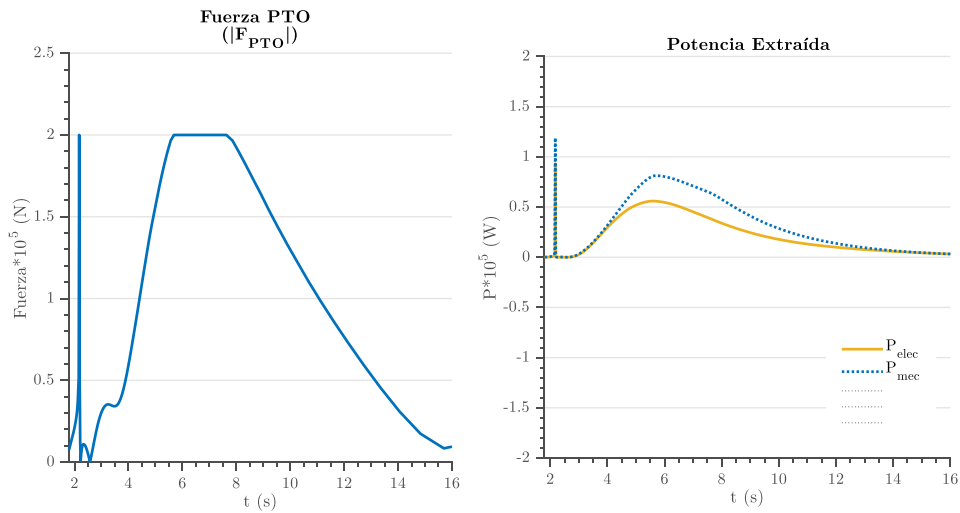


Figura 56. Resultados de WEC-Sim: fuerza del PTO y potencia extraída por el absorbedor puntual de dos cuerpos.

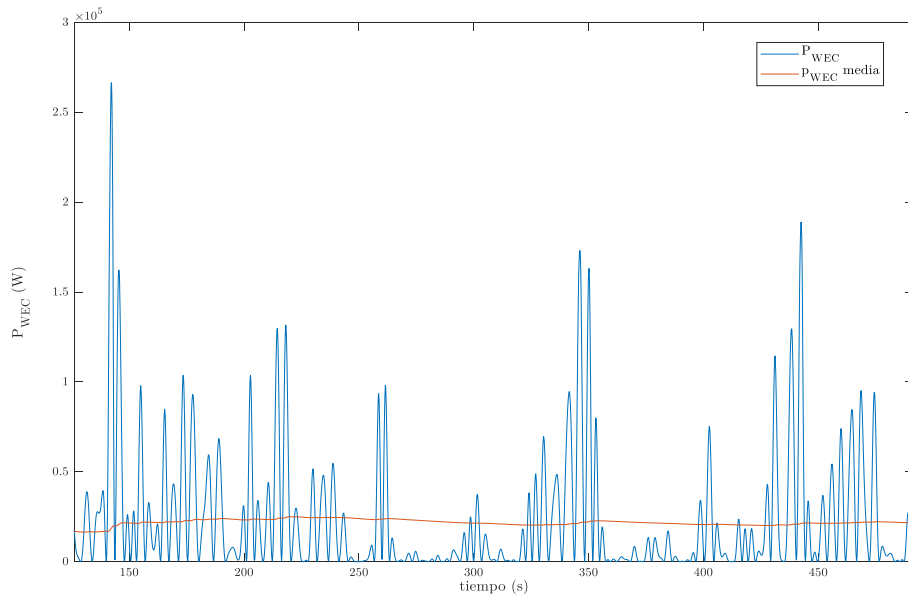


Figura 57. Perfil de Potencia generada por el absorbedor puntual de dos cuerpos. Fuente: elaboración propia a partir del modelo.

## 5.4 Modelo de parque de generación undimotriz.

### 5.4.1 Definición de parámetros parque de generación undimotriz.

Determinado el modelo de WEC se plantea como siguiente paso la agrupación de varios WECs formando un parque de generación.

Existen una serie de parámetros o variables de diseño a la hora de plantear la agrupación de varios WECs en el mar. Como se detalló en el apartado dedicado al estado del arte estas variables repercuten en la potencia final extraída por el parque de generación undimotriz. Las variables que se han tenido en cuenta a la hora de determinar el modelo de parque de generación undimotriz se resumen en la Figura 58.

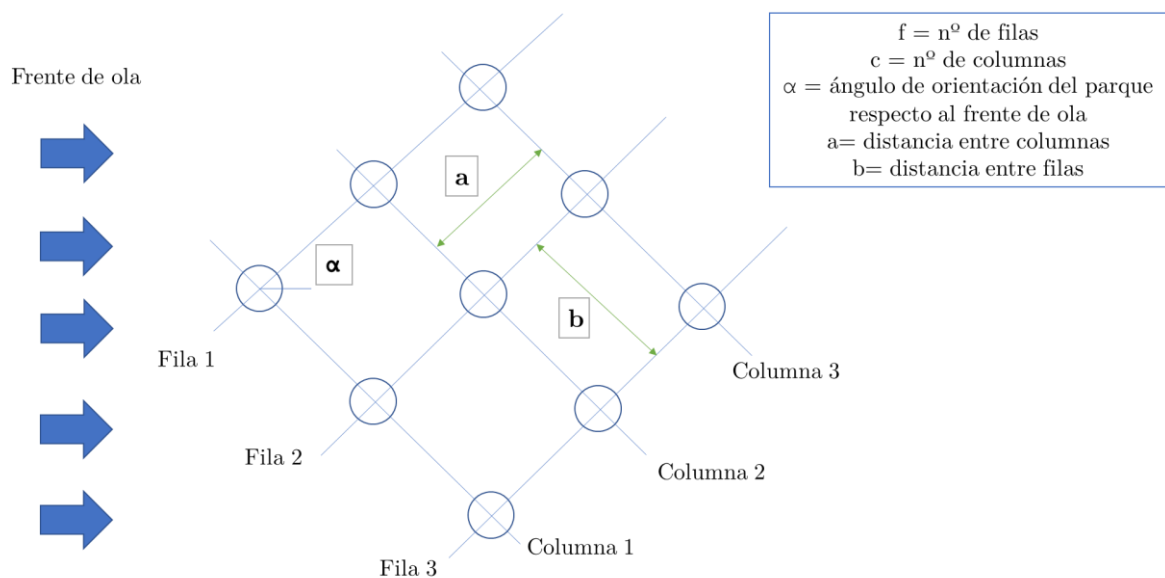


Figura 58. Parámetros de diseño de un parque de generación undimotriz.

Para el modelo de parque de generación undimotriz se ha elaborado un script dentro del entorno Matlab en el cual se han incluido como datos de entrada las variables de diseño del parque junto con la potencia instalada ( $n^{\circ}$  de convertidores) a integrar en el parque. También se incluyen como datos de entrada las características del estado de mar. Desde este script se llamará al modelo del WEC que se ha sido modelado mediante el procedimiento expuesto previamente.



Como solución al modelo se genera un struct de datos en donde se resumen las variables propias del parque, así como la potencia instantánea generada ( $P_{GEN}$ ) en función de las variables de entrada seleccionadas.

#### 5.4.2 Modelo de parque de generación undimotriz en la isla de Tenerife.

Realizada la modelización del absorbedor puntual se procede a la agrupación varios WECs formando un parque de generación. Para el diseño espacial del parque de generación undimotriz en el mar se tendrán en cuenta las variables expuestas en el apartado anterior para generar el modelo de parque de generación.

Aunque se ha incluido la variable distancia entre WECs, que también será la distancia entre filas de la cuadrícula del parque de generación, para el presente estudio se ha realizado la consideración de que no va a existir interacción entre los WECs, estableciéndose una separación mínima de 600 metros entre ellos [74].

Otra variable que se ha tenido en consideración y que presenta interés para el estudio de estabilidad, es el ángulo de orientación del parque de generación respecto al frente de ola.

Para el caso de estudio de la presente tesis doctoral se han planteado un parque formado por 50 WECs donde se han planteado diferentes escenarios en función de las variables de diseño.

En la Figura 59 se representa gráficamente el perfil de potencia generada ( $P_{GEN}$ ) para el parque de generación undimotriz para un diseño de parque establecido ( $n^\circ$  filas = 2; ángulo de incidencia del oleaje  $\alpha=0^\circ$ ).

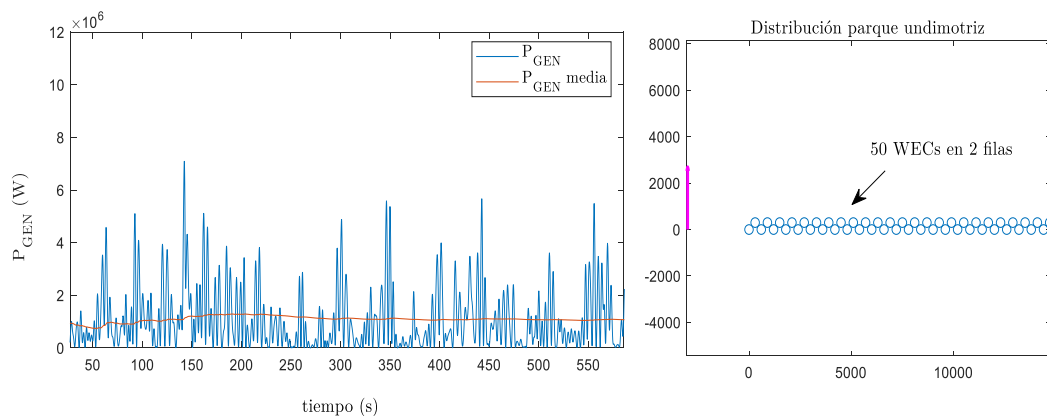


Figura 59. Perfil de potencia parque undimotriz 50 WECs para un diseño de parque de generación establecido.

## 5.5 Modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia.

En el presente apartado se resumirán los conceptos teóricos necesarios para la realización del modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia y se aplicarán dando como resultado la modelización de la red eléctrica débil para la isla de Tenerife.

### 5.5.1 Fundamentos del control frecuencia-potencia.

Recordando lo expuesto en el apartado de antecedentes teóricos relativo a la estabilidad de frecuencia de red del Capítulo 2 del presente documento la frecuencia de red debe permanecer dentro de unos límites establecidos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones óptimas. La frecuencia de un sistema eléctrico está relacionada con el equilibrio entre generación y carga. En régimen permanente todos los generadores síncronos de una red eléctrica funcionan en sincronismo. Variaciones fuera de los valores establecidos que provoquen subfrecuencias o sobrefrecuencias pueden provocar [120]:

- Incremento lineal de la inductancia de las líneas con la frecuencia.
- Mejora del rendimiento de motores con colectores.
- Reducción del acoplamiento magnético entre circuitos vecinos con la consiguiente disminución de interferencias electromagnéticas.
- Obtención de una iluminación más continua en algunas lámparas.
- Reducción de la sección de hierro necesaria en los circuitos magnéticos de los transformadores.

El elemento básico para ejercer el control frecuencia-potencia en un sistema eléctrico es el generador síncrono con una turbina que puede ser de vapor, de gas o de agua para poder regular el flujo entrante a la misma y por lo tanto la potencia mecánica aportada por el generador síncrono.

Como entrada al sistema de control se utiliza la velocidad de giro del eje y la consigna de potencia recibida desde el exterior de la planta. La variable sobre la que actúa el control es la válvula de admisión de la turbina.

La regulación de la frecuencia como se resumió (Capítulo 2) se organiza en tres niveles: regulación primaria, secundaria y terciaria según lo establecido en los procedimientos de operación por el TSO correspondiente.

En el modelo de red utilizado en la presente tesis doctoral se ha realizado la modelización de la red eléctrica en el régimen de la frecuencia teniendo en cuenta la regulación primaria y secundaria.

A continuación, se procede a describir las funciones de transferencia y bloques fundamentales para la elaboración del modelo de red en el régimen de la frecuencia.

### 5.5.2 Regulación primaria.

La ecuación básica del movimiento del conjunto eje-turbina de un generador síncrono (Ecuación 15). En donde aparece el par mecánico aportado por la turbina  $T_m$  y el par electromagnético  $T_e$ ,  $J$  es el momento de inercia y es el ángulo del rotor  $\theta_r$ .

$$J \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = (T_m - T_e)$$

*Ecuación 15. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina.*

Sustituyendo  $\frac{d^2 \theta_r}{dt^2}$  por  $\frac{d\Delta\omega_r}{dt}$  donde  $\omega_r$  es la velocidad del rotor,  $\Delta\omega_r$  es la desviación de velocidad la Ecuación 15 se transforma en:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e)$$

*Ecuación 16. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina simplificada.*

Si tomamos como potencia base  $S_{base}$  la potencia nominal de la máquina, como frecuencia base  $\omega_{base}$  la frecuencia de referencia y como par base  $T_{base} = S_{base} / \omega_{base}$  se realiza la transformación de la Ecuación 16 a valores unitarios (Ecuación 17).

$$\frac{d\Delta\omega_r[pu]}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m[pu] - T_e[pu])$$

*Ecuación 17. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina valores pu.*

Donde  $H$  es la constante de inercia (Ecuación 18):

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{base}^2}{S_{base}}$$

*Ecuación 18. Constante de inercia.*

La constante de inercia es el parámetro más utilizado en la regulación de sistemas eléctricos y representa la energía cinética acumulada en el eje a la velocidad de sincronismo dividida por la potencia base.

Dado que el sistema regula la potencia eléctrica se va a representar la Ecuación 17 en términos de potencia en base a  $P = \omega_r T$ . Se considerará una pequeña desviación de un estado inicial (subíndice 0).

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T)$$

*Ecuación 19. Ecuación movimiento conjunto eje-turbina en función de la potencia.*

Tomando sólo los incrementos despreciando el segundo orden y teniendo en cuenta que estamos en régimen permanente la Ecuación 19 se transforma en Ecuación 20 conocida como la ecuación de oscilación de una máquina síncrona, cuyo diagrama de bloques se representa en Ecuación 19

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e)$$

Ecuación 20. Ecuación de oscilación de una máquina síncrona.

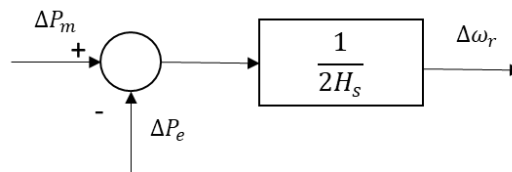


Figura 60. Función de transferencia entre potencia y frecuencia.

Algunas cargas demandan una potencia independiente de la frecuencia de alimentación otras responden de un incremento de la frecuencia aumentando la demanda. La relación entre ese incremento de demanda total  $\Delta P_e$  y el incremento de frecuencia de un sistema se define como por la Ecuación 21.

$$\Delta P_e = \Delta P_l + D\Delta\omega_r$$

Ecuación 21. Relación incremento de la demanda e incremento de la frecuencia.

Donde  $P_l$  es el incremento de potencia independiente de la frecuencia y  $D$  es la constante que relaciona la variación de la frecuencia con el incremento de potencia debido a ella. La constante  $D$  actúa como un mecanismo de amortiguamiento de la variación de la frecuencia.

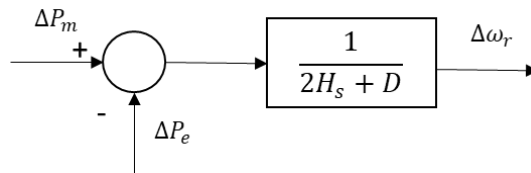


Figura 61. Diagrama de bloques del efecto de la frecuencia sobre la demanda.

Si consideramos un sistema de regulación que cierre el bucle entre el error de la frecuencia y potencia mecánica mediante la acción de un regulador. Ante un error negativo de la frecuencia el regulador aumenta la potencia mecánica aplicada sobre el eje lo que reduce el error. Cuando el error de frecuencia es cero se alcanza el régimen permanente.

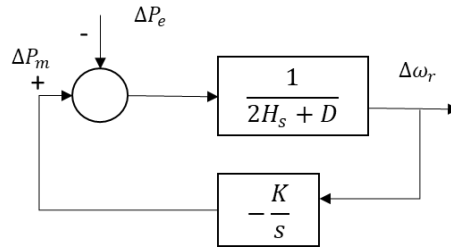


Figura 62. Diagrama de bloques del efecto de la frecuencia sobre la demanda con la acción de un regulador.

Para que varios generadores participen en la regulación primaria de frecuencia para un mismo sistema eléctrico se aplica en cada uno de ellos una característica frecuencia-potencia en régimen permanente negativa mediante la introducción de un lazo de control adicional (Figura 63), donde  $T_g = \frac{1}{KR}$ .

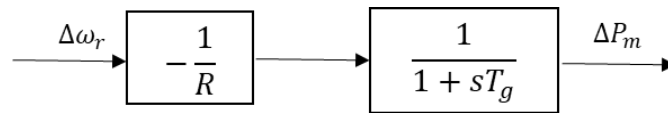


Figura 63. Diagrama de bloques de un regulador primario con estatismo.

Donde  $R$  es la constante que determina la característica del regulador en régimen permanente y se conoce como estatismo.

$$R = - \frac{\text{incremento relativo de frecuencia}}{\text{incremento relativo de potencia}} = \frac{\omega_v - \omega_{pc}}{\omega_0}$$

Ecuación 22. Definición estatismo.

Donde  $\omega_v$  es la frecuencia en régimen permanente sin carga,  $\omega_{pc}$  es la frecuencia en régimen permanente a plena carga y  $\omega_0$  es la frecuencia nominal.

El estatismo puede expresarse en valores unitarios o porcentuales. Por ejemplo, un estatismo del 5 % significa que un incremento de frecuencia del 5 % provoca un incremento del 100 % en la apertura de la válvula y en la potencia de salida. Este mecanismo permite la participación simultánea de varias unidades generadoras en la regulación primaria de frecuencia ( $R_1, R_2$ ) aunque la presencia del estatismo provoca la aparición de un error en la frecuencia en régimen permanente, al contrario de lo que sucedía en el caso del regulador.

La unidad con menor estatismo contribuye a la regulación primaria con mayor porcentaje de potencia respecto a su potencia nominal, y la que tiene mayor estatismo contribuye con menor porcentaje de potencia.

Se puede modificar la potencia de referencia en el generados introduciendo una consigna de potencia en el lazo de regulación primaria (Figura 64).

La acción de modificar la consigna de potencia equivale gráficamente a desplazar la característica frecuencia-potencia.

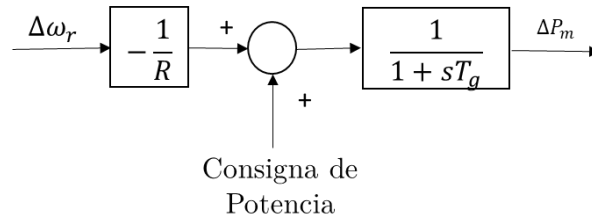


Figura 64. Diagrama de bloques con consigna de potencia.

En la Figura 65 se resume en diagramas de bloques la regulación primaria en función de los bloques descritos anteriormente.

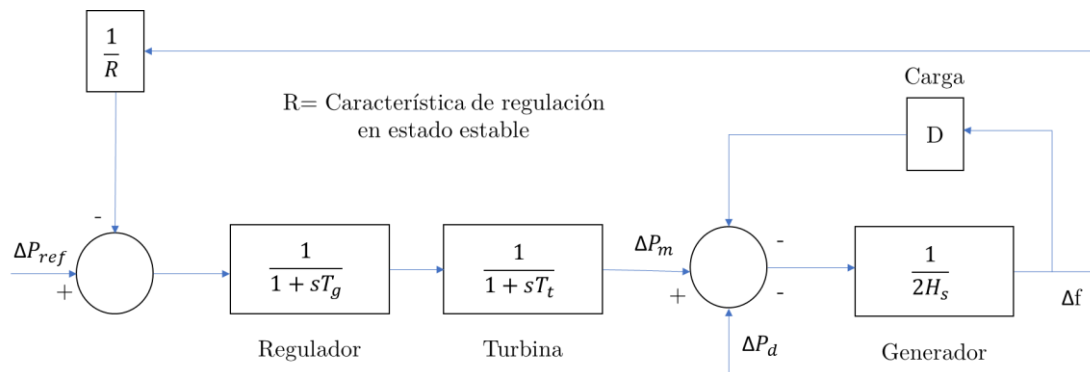


Figura 65. Diagrama bloques regulación primaria.

Junto con el estatismo, el tiempo de establecimiento y banda muerta son los otros indicadores que se utilizan para evaluar la calidad de servicio en lo que respecta a la regulación primaria.

El tiempo de establecimiento es aquel que tarda la potencia mecánica de la unidad en ingresar a la banda de 10% el valor final ante una variación en la frecuencia tipo escalón.

La banda muerta es una característica que define el intervalo de cambio de frecuencia con respecto a la nominal y en el cual no tiene efecto la característica de estatismo, por lo que la unidad no participa en la regulación primaria en esta banda muerta.

Es la banda de variación de frecuencia alrededor de la nominal que no produce cambios en la potencia mecánica de la unidad. La misma puede ser programada para evitar oscilaciones de las válvulas de control o estar presentes en los actuadores.

### 5.5.3 Regulación secundaria.

En un sistema eléctrico débil o aislado no es necesario mantener los flujos de potencia programados con alguna área vecina, por lo que la única función de la regulación secundaria es la de restaurar la frecuencia de referencia. Esta acción se consigue añadiendo una acción de control suplementaria sobre la frecuencia en al menos uno de los generadores del sistema. Ante una variación de carga la regulación secundaria es más lenta que la regulación primaria. Al devolver la frecuencia del sistema a su valor de referencia la regulación secundaria restaura automáticamente la generación de todas las plantas que únicamente participan en la regulación primaria.

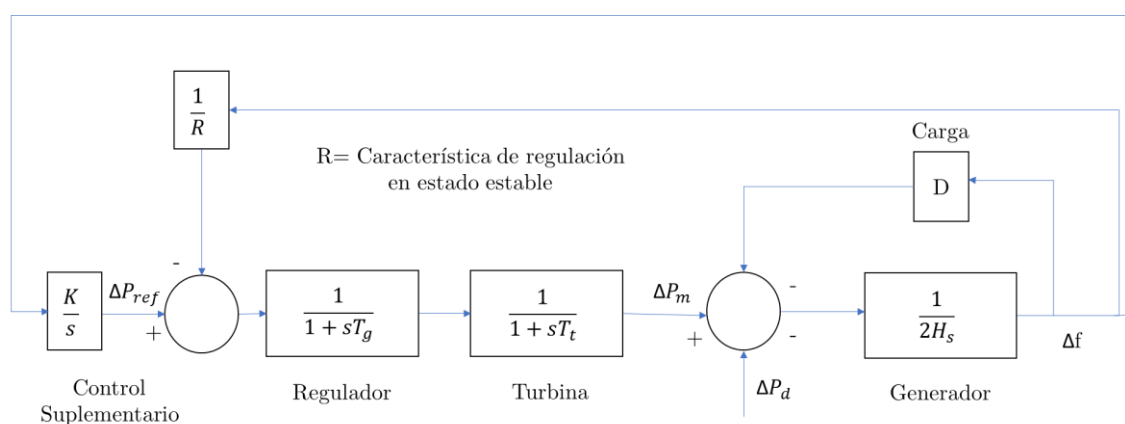


Figura 66. Diagrama bloques regulación secundaria.

### 5.5.4 Modelo de la red eléctrica de Tenerife en el régimen de la frecuencia.

El modelo de red eléctrica débil se ha modelado en el régimen de la frecuencia mediante la herramienta Simulink perteneciente al entorno de Matlab.

Para la modelización en el régimen de la frecuencia se han implementado en el modelo los procedimientos de operación de regulación primaria y secundaria por medio de funciones de transferencia de primer y segundo orden. El cálculo de los coeficientes para estas funciones se ha realizado a partir de datos de eventos ocurridos en la isla de Tenerife dentro de sus procedimientos de operación del sistema eléctrico.

Se ha utilizado un modelo de simulación inercial de un nodo único (Figura 67) para el modelado de la red eléctrica débil de la isla de Tenerife. El modelo calcula la desviación de frecuencia del sistema ( $f_{\text{grid}}$ ) en función de la variación tanto de la carga  $P_{\text{Load}}$  como de la potencia activa inyectada por el parque de generación undimotriz  $P_{\text{WEC}}$ .

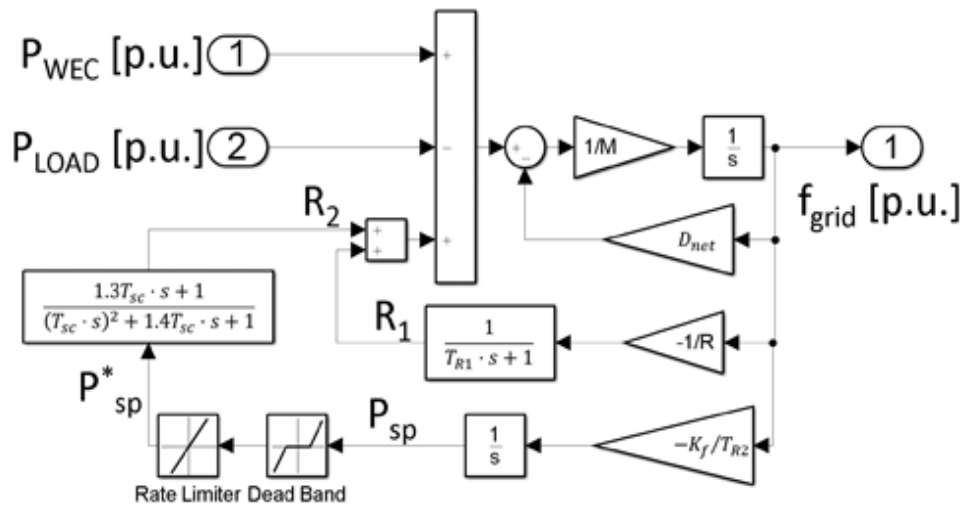


Figura 67. Diagrama de bloques del modelo red eléctrica de Tenerife de bus único. Fuente: elaboración propia.

La respuesta del control primario de frecuencia de carga de las unidades giratorias  $R_1$  se calcula mediante Ecuación 23 donde  $R$  representa la caída de velocidad agregada de todas las unidades generadoras giratorias. La insensibilidad de frecuencia de los reguladores de velocidad se considera un pequeño retraso ( $T_{R1}$ ) en la respuesta del control primario de frecuencia de carga.

En el sistema de Tenerife, un sistema de control automático de generación (AGC) se encarga de restaurar la frecuencia del sistema a su valor nominal (50 Hz) después de la realización del control de frecuencia de carga primaria. El sistema AGC genera una señal de valor de consigna de potencia agregada  $P_{sp}$  para las unidades generadoras giratorias por medio de un bucle de control proporcional-integral (Ecuación 24). La ganancia proporcional  $K_f$  es conceptualmente similar al factor  $K$  utilizado en los sistemas de energía de Europa continental [33]. Se considera un pequeño retraso en la generación de la señal de consigna de potencia  $T_{R2}$ .

Como se puede ver en la Ecuación 25, la señal de valor de consigna de potencia agregada  $P_{sp}$  se pasa a través de una banda muerta y un limitador de velocidad. La salida del limitador de velocidad  $P^*_{sp}$  se usa como entrada de una función de transferencia lineal de segundo orden cuya salida es la respuesta del control de frecuencia de carga secundaria de las unidades generadoras de giro  $R_2$  (Ecuación 26) [121]. La función de transferencia depende del parámetro  $T_{sc}$  que no tiene un significado físico directo y que se propone en [121] para capturar adecuadamente la velocidad de respuesta del control de frecuencia de carga secundaria de las unidades generadoras giratorias.

$D_{net}$  ha considerado la sensibilidad de la carga a las variaciones en la frecuencia del sistema que proporciona un efecto autorregulador.



La inercia mecánica agregada  $M$  (igual a dos veces la constante de inercia  $H$ ) de todas las unidades generadoras y la caída de velocidad agregada ( $R$ ) se han estimado como se sugiere en [122] a partir de los registros de frecuencia del sistema proporcionados por el TSO. Los otros parámetros del modelo se estimaron mediante simulaciones [123].

$$M \frac{df_{grid}}{dt} = P_{WEC} - P_{LOAD} - D_{net} \cdot f_{grid} + R_1 + R_2$$

*Ecuación 23. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia I.*

$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{1}{T_{R1}} \left( -\frac{f_{grid}}{R} - R_1 \right)$$

*Ecuación 24. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia II.*

$$\frac{dP_{sp}}{dt} = -\frac{K_f}{T_{R2}} \cdot f_{grid}$$

*Ecuación 25. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia III.*

$$1,3T_{sc} \cdot \frac{dP_{sp}^*}{dt} + P_{sp}^* = T_{sc}^2 \cdot \frac{d^2R_2}{dt^2} + 2 \cdot 0,7 T_{sc} \cdot \frac{dR_2}{dt} + R_2$$

*Ecuación 26. Modelización red eléctrica Tenerife régimen de la frecuencia IV.*



## Capítulo 6

### 6 Estudio de Estabilidad de la frecuencia.

#### 6.1 Introducción.

Haciendo uso del modelo conjunto desarrollado en el Capítulo 5, dentro del Capítulo 6 se realizará el estudio de estabilidad de la frecuencia para una red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación undimotriz en su sistema.

Para la realización del estudio se seguirá el procedimiento resumido en el diagrama de flujo definido en la Figura 68.

En primer lugar, se establecerán los parámetros o variables base para la generación de diferentes escenarios del parque de generación undimotriz de los cuales se obtendrán los diferentes perfiles de potencia a integrar en el modelo de la red eléctrica débil. Se obtendrán los perfiles de potencia instantánea y energía total generada para cada escenario de parque de generación undimotriz.

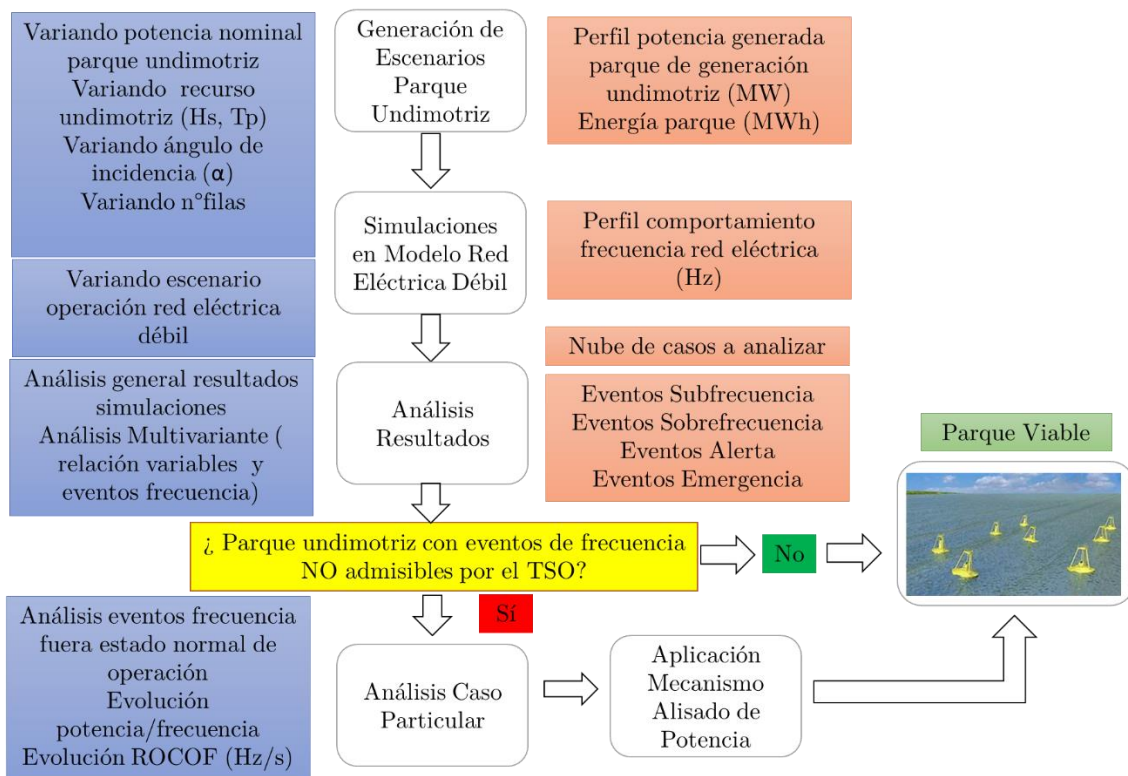


Figura 68. Diagrama flujo para el estudio estabilidad frecuencia red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación undimotriz en su sistema. Fuente: elaboración propia.

Los perfiles de potencia para cada caso se integrarán en el modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia para distintos escenarios de red obteniendo el perfil de comportamiento de la frecuencia para cada escenario. Partiendo del perfil de frecuencia de red obtenido para cada escenario y teniendo en cuenta la normativa referente a la estabilidad de la frecuencia para redes eléctricas débiles se procederá a cuantificar el número de eventos fuera del estado normal de operación. Se cuantificarán cuáles de esos eventos fuera del estado normal de operación son considerados eventos no admisibles por el TSO (estados en alerta y emergencia del sistema). Partiendo de la nube de datos generada se realizará un análisis de los resultados. Se realizará un análisis multivariante con el objetivo de evaluar la relación entre las variables establecidas para cada escenario de estudio y la aparición de eventos fuera del estado normal de operación del sistema eléctrico.

Una vez determinados los escenarios de parque de generación undimotriz en los que se producen oscilaciones de frecuencia y eventos no admisibles por el TSO, se procederá a la selección de un escenario desfavorable, al cual se realizará un análisis en profundidad tomando el perfil de potencia instantánea entregada por el parque de generación a la red eléctrica débil, así como el perfil de comportamiento de las desviaciones de frecuencia completando el estudio de la estabilidad de la red eléctrica con la evaluación del perfil del *ROCOF* (Hz/s). El objetivo del análisis de un escenario en particular es el de determinar la relación entre la evolución de la potencia instantánea del parque de generación undimotriz y la evolución de las desviaciones frecuencia. Los resultados obtenidos en este análisis se utilizarán posteriormente para la aplicación de los mecanismos de alisado de la potencia para contribuir a la estabilidad de la frecuencia de red eléctrica débil (Capítulo 7).

## 6.2 Generación de escenarios parque de generación undimotriz.

Como primer paso se realizará la generación de los diferentes escenarios de parque de generación undimotriz. Esta variabilidad tiene como objetivo generar múltiples escenarios de generación. Se obtendrá el perfil de potencia del parque de generación undimotriz de cada escenario propuesto. Estos perfiles de potencia serán la variable de entrada a integrar en el modelo de la red eléctrica débil. Para la obtención del perfil de generación del parque de generación undimotriz en función de los parámetros escogidos en cada escenario se hará uso del modelo de parque de generación, desde la cual se llama al modelo de WEC seleccionado como tecnología base del parque.

Las variables seleccionadas en función del modelo de parque de generación descrito en el Capítulo 5 son: potencia instalada de parque de generación (MW), recurso undimotriz

( $H_s$  (m),  $T_p$  (s)), ángulo de orientación del parque respecto al frente de ola ( $\alpha$ ) y  $n^\circ$  de filas que conforman el parque.

Se establecerán los valores para dichas variables, teniendo en cuenta las características diferenciadoras de la localización donde se quieren integrar los parques de generación undimotriz, y de la combinación entre ellos se establecerán los escenarios de generación.

También se determinará el tiempo de la ventana de simulación y los intervalos (s) de entre medida y media de la potencia generada por el parque undimotriz.

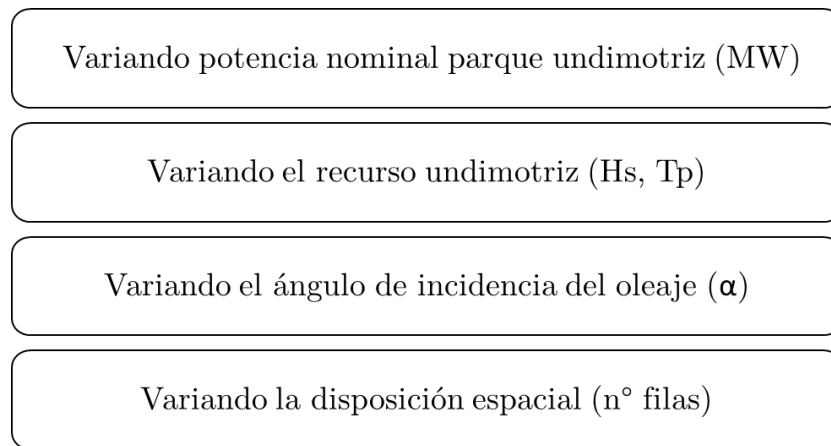


Figura 69. Escenarios de simulación estudio estabilidad de la frecuencia de red.

### 6.2.1 Generación de escenarios parque generación undimotriz isla de Tenerife.

En el presente apartado se ha realizado la generación de escenarios de parque de generación undimotriz para el caso ejemplo de la isla de Tenerife.

En primer lugar, se establecerán los valores de las variables para generar los diferentes escenarios de parque de generación undimotriz que darán como resultado las diferentes potencias de parque.

Los diferentes valores para la variable potencia instalada han sido determinados en base a la formación de agrupaciones de un  $n^\circ$  determinado de WECs formando parques de generación. Partiendo que el valor de la potencia nominal para el WEC absorbedor puntual de dos cuerpos utilizado como modelo de captación es de 200 kW se ha establecido la creación de parques de 50 WECs. Se ha propuesto la integración escalada partiendo de 1 parque de generación (10MW) hasta llegar a la integración de 5 parques (50MW) distribuidos en las zonas viables determinadas en el estudio del recurso del oleaje en el norte de la isla de Tenerife. Se ha tomado el valor límite de 50 MW como potencia máxima instalada de potencia undimotriz para la isla de Tenerife siguiendo lo establecido

en el Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC) [124], que propone a horizonte 2030 como potencia máxima instalada de energías oceánicas 50 MW.

Los valores seleccionados para el recurso undimotriz se han tomado dos estados de oleaje de los resultados obtenidos del estudio del oleaje para la isla de Tenerife.

Los valores de ángulo de orientación de parque y n° de filas se han tomado con el objetivo de obtener una distribución espacial de parque de generación mallada.

P <sub>PARQUE</sub> (MW)					H <sub>s</sub> (m)		T <sub>p</sub> (s)		α (°)				n°filas			
10	20	30	40	50	2,5	1,5	15	12	0	20	-20	45	1	2	5	10

Tabla 12. Parámetros para la generación de escenarios de parque de generación para la isla de Tenerife.

Una vez establecidos los valores de las variables se han realizado las combinaciones entre ellos creando los diferentes escenarios de estudio. Se ha procedido a la integración de cada escenario en el modelo de generación de parque de generación. Como variables de entrada al modelo de parque de generación se han introducido los valores establecidos para cada escenario y el modelo del absorbedor puntual de dos cuerpos. Se ha tomado una ventana temporal de simulación de 1 hora de generación de parque tomando cada valor de la potencia de generación para intervalos de 0,01s.

Para cada valor de potencia instalada se obtienen 256 escenarios de parque de generación undimotriz de la combinación de los parámetros resumidos en la Tabla 12. Como resultado de cada simulación se ha obtenido el perfil de potencia instantánea (MW) y energía generada (MWh) para cada escenario de parque de generación undimotriz (ver Anexo Capítulo 6).

A continuación, se representan los resultados más significativos de la generación de escenarios. Como criterio para la representación gráfica se procede a variar una de las variables del parque manteniendo constante el resto. El objetivo de la representación gráfica de estos resultados es evaluar el comportamiento del perfil de la potencia instantánea generada por el parque undimotriz ante diferentes escenarios de parque en función de cada una de las variables. Esta evaluación previa contribuirá a un mejor entendimiento de los resultados de las simulaciones cuando se integran dichos perfiles de potencia en la red eléctrica débil de la isla de Tenerife donde se obtendrán los perfiles de desviaciones de frecuencia. También nos van a ser de utilidad a la hora de la aplicación del mecanismo de alisamiento de la potencia para contribuir a la estabilidad de la frecuencia (Capítulo 7). Se han representado en distintas ventanas temporales para facilitar visualización de los resultados.

### 6.2.1.1 Resultados variando la potencia instalada ( $P_{PARQUE}$ ).

Los resultados de los perfiles de potencia generada por el parque undimotriz en el caso de variar la potencia instalada se representan en este subapartado. La potencia instantánea generada por el parque está directamente relacionada con la potencia instalada. A mayor potencia instalada mayor será la potencia generada por el parque de generación.

Para la representación de los resultados se ha tomado como variables constantes del parque undimotriz un recurso del oleaje:  $H_s=2,5$  m y  $T_p=12$  s, con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  y un n° de filas de 2 cada una formada por 25 WECs.

Como era de esperar y se observa la gráfica comparativa de la Figura 70 al aumentar la potencia instalada o lo que es lo mismo ir incrementando la presencia de parques la potencia generada aumenta de manera directa.

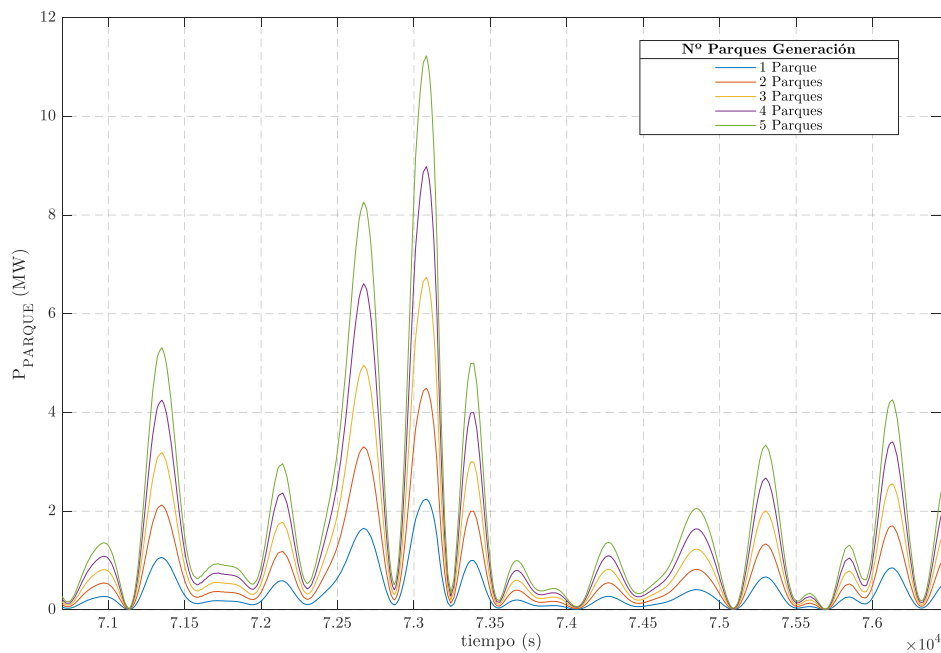


Figura 70. Perfiles de potencia generada variando la potencia instalada de energía undimotriz (1 parque- 5 parques). Ventana ampliada.

Para la representación y análisis del resto de resultados se ha tomado un valor de potencia instalada de 50MW, siendo este valor representativo de una generación de parque a escala real.

### 6.2.1.2 Resultado variando el recurso undimotriz ( $H_s - T_p$ ).

Se grafican los resultados de la potencia instantánea generada por el parque undimotriz variando el recurso undimotriz dejando fijos las otras variables del parque de generación. En este caso se establece como potencia instalada 50 MW siendo un total de 5 parques de 50 WECs, cada uno de ellos con un ángulo de orientación  $0^\circ$  y  $n^\circ$  de filas de parque igual a 2.

Como se puede observar en la Figura 71 los valores de potencia instantánea mayores aparecen para los casos en donde el recurso presenta valores más altos para la altura de ola ( $H_s$ ).

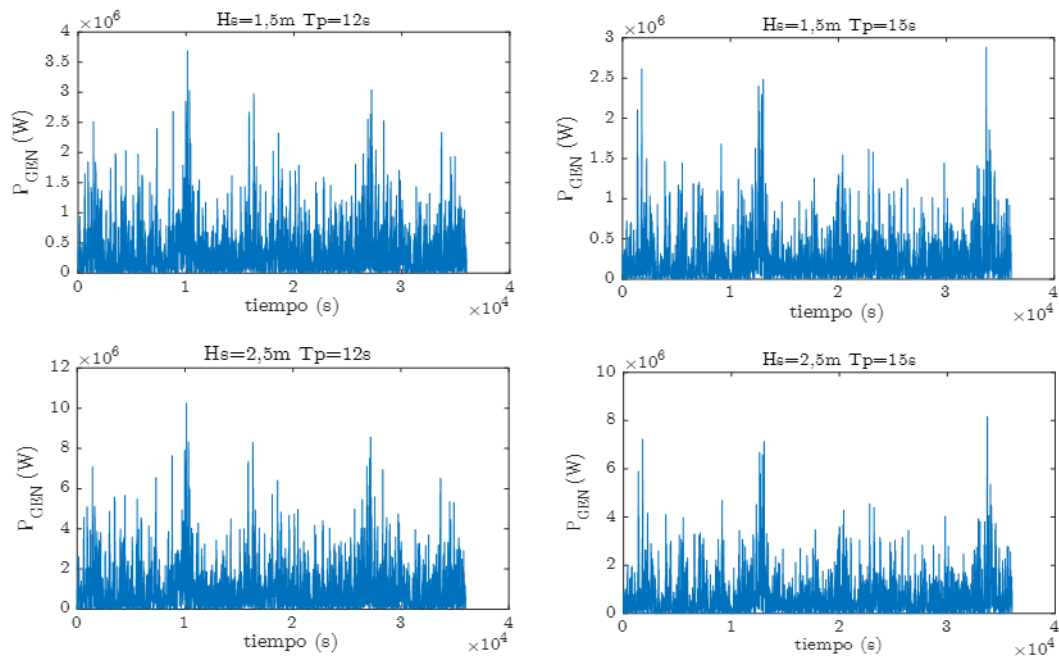


Figura 71. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz para diferentes recursos del oleaje.

Se analiza también el comportamiento de la potencia instantánea ante una variación del recurso undimotriz variando uno de los parámetros que definen el estado del oleaje manteniendo constante el otro parámetro.



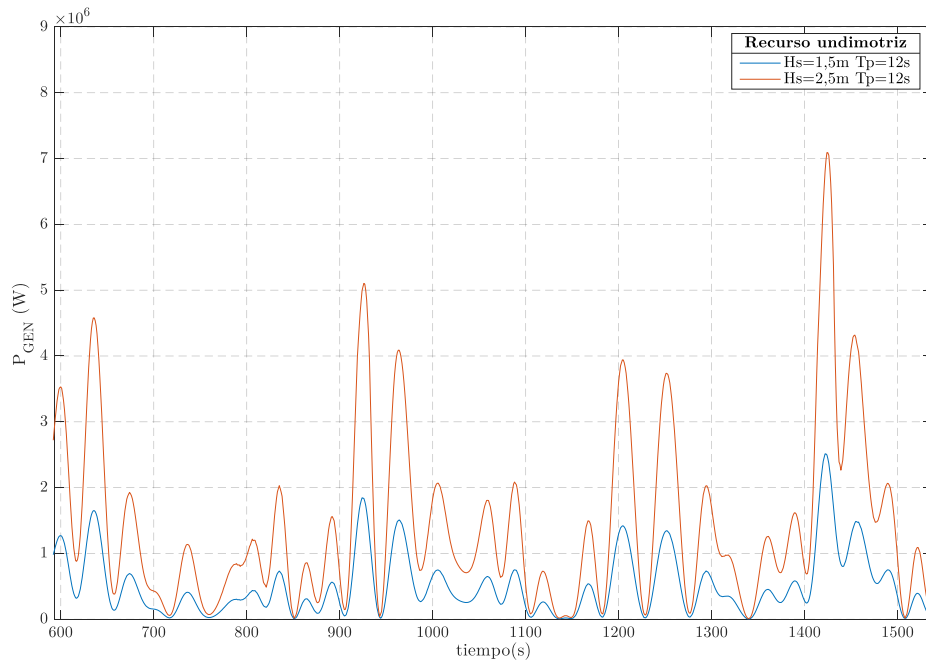


Figura 72. Potencia instantánea parque undimotriz variando la altura significativa de la ola  $H_s(m)$ .

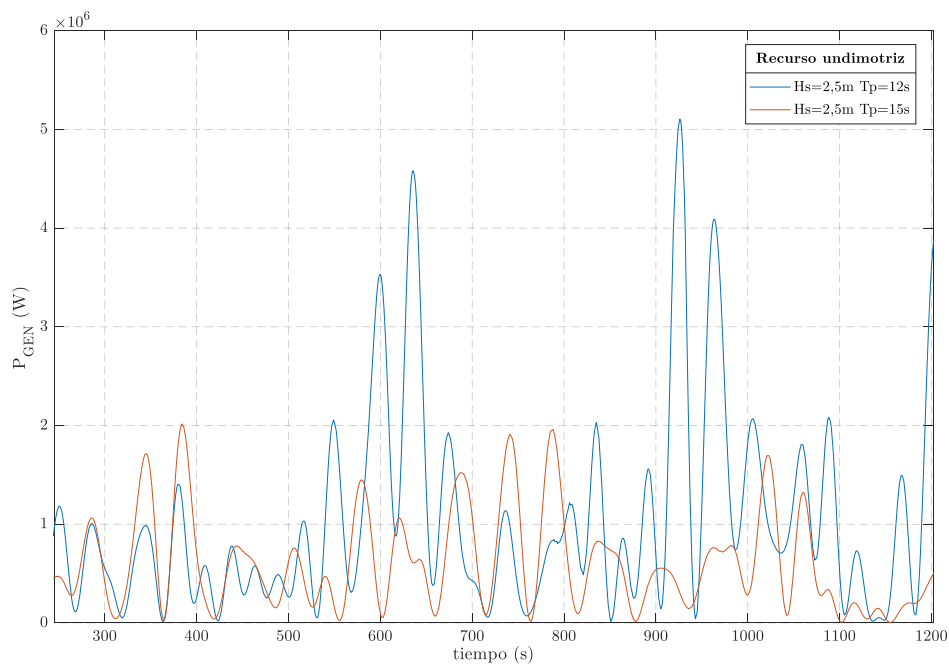


Figura 73. Potencia instantánea parque undimotriz variando el período de la ola  $T_p(s)$ .

En Figura 72 y Figura 73 los picos de potencia instantánea aparecen para valores altos de la altura significativa de ola  $H_s$  y valores bajos de período de pico  $T_p$ .

### 6.2.1.3 Resultados variando el $n^\circ$ de filas.

En este caso se presentan gráficamente los resultados obtenidos variando el  $n^\circ$  de filas del parque y se mantienen constantes otros parámetros del parque. En este caso se establece como potencia instalada 50 MW siendo un total de 5 parques de 50 WECs, cada uno de ellos con un ángulo de orientación  $0^\circ$  y tomando como estados del recurso del oleaje  $H_s=2,5$  m y  $T_p = 12$  s.

Como se observa en la Figura 74 la agrupación o distribución espacial de los WECs en el mar influye de manera significativa en el comportamiento de la potencia instantánea del parque. A destacar que todos los perfiles presentan picos pronunciados de generación.

En la Figura 75 se comparan los perfiles de potencia generada variando el  $n^\circ$  de filas. Como se observa al aumentar el  $n^\circ$  de filas del parque se produce un alisado del perfil de potencia generada pero los valores más altos o picos de potencia generada aparecen para distribuciones de parque de una sola fila.

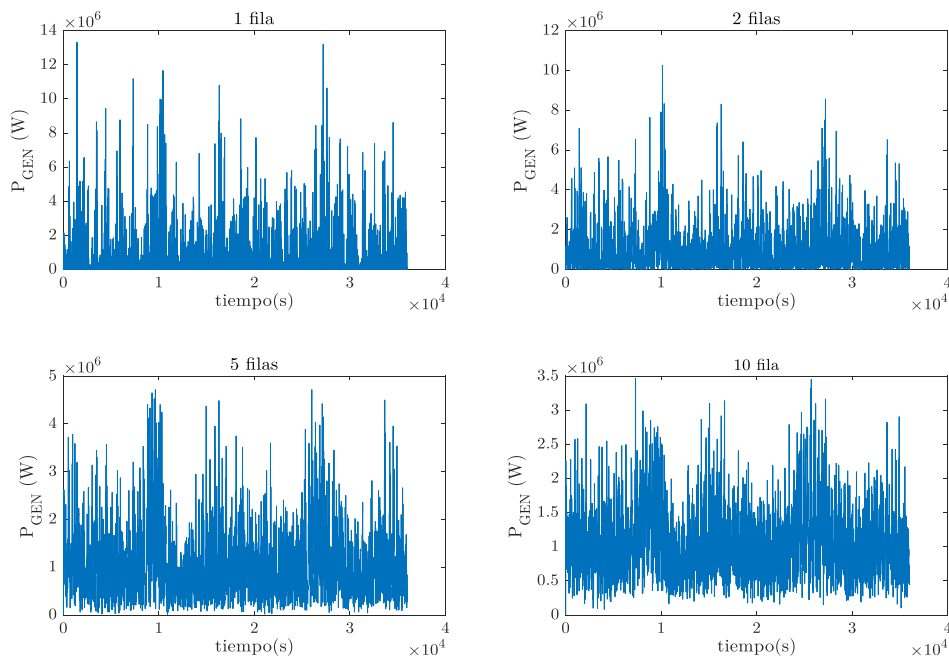


Figura 74. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz variando en  $n^\circ$  de filas.

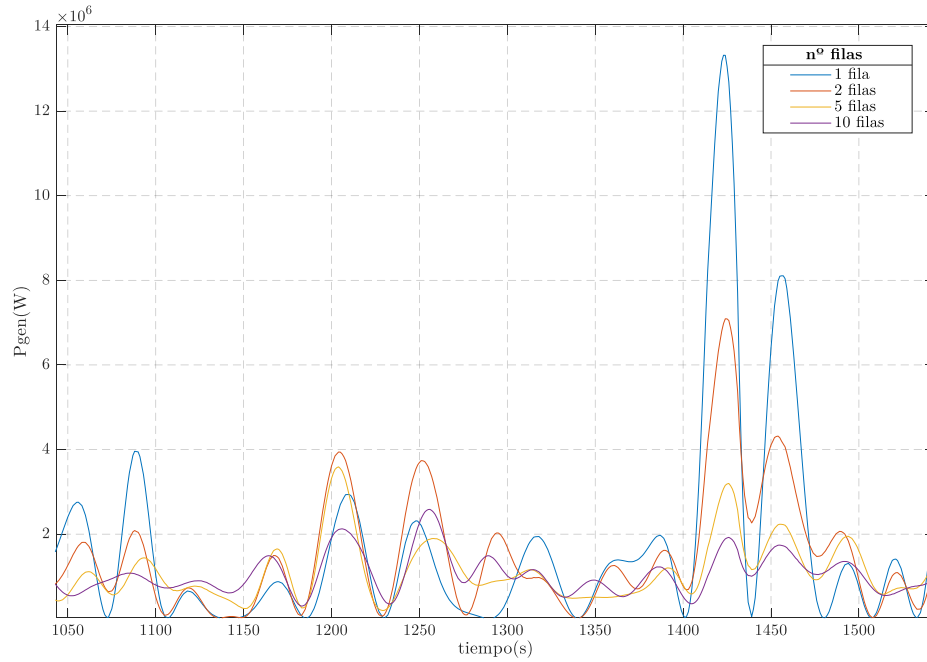


Figura 75. Potencia instantánea parque undimotriz variando en nº de filas.

#### 6.2.1.4 Resultados variando el ángulo de orientación ( $\alpha$ ).

En este caso se grafican resultados obtenidos variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ) y se mantienen constantes otros parámetros del parque. En este caso se establece como potencia instalada 50 MW siendo un total de 5 parques de 50 WECs, cada uno de ellos con un nº de filas igual a 2, y tomando como estados del recurso del oleaje  $H_s=2,5$  m y  $T_p=12$  s.

Como se observa en la Figura 77 el ángulo de incidencia hace que se presenten grandes diferencias en las gráficas de perfil de comportamiento de la potencia generada. Para el valor para  $\alpha=0^\circ$  se presentan los mayores valores para la potencia generada, pero para todos los casos de ángulo la característica presenta grandes picos de oscilación.

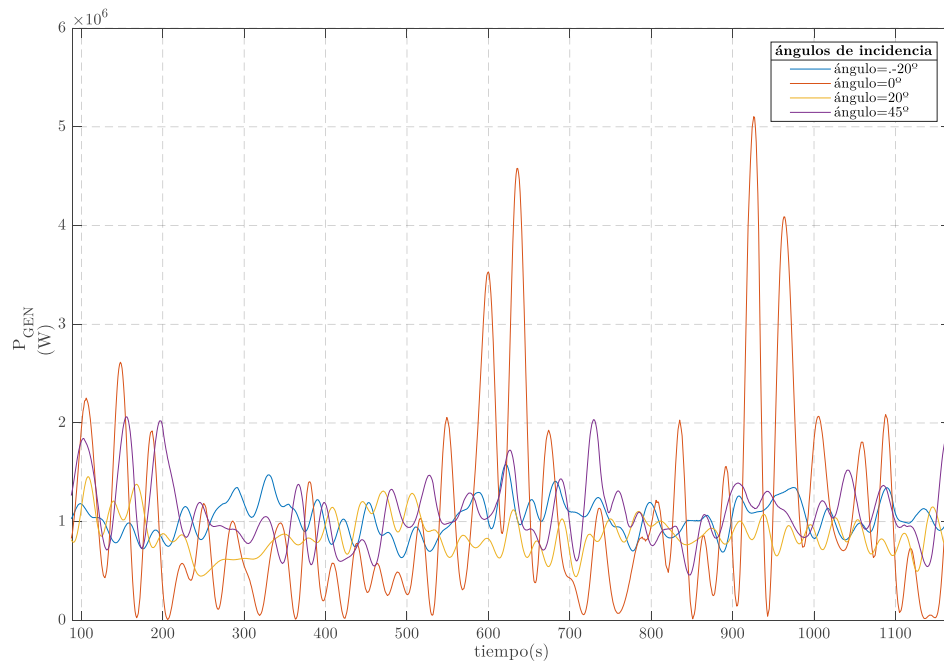


Figura 76. Potencia instantánea parque undimotriz variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ).

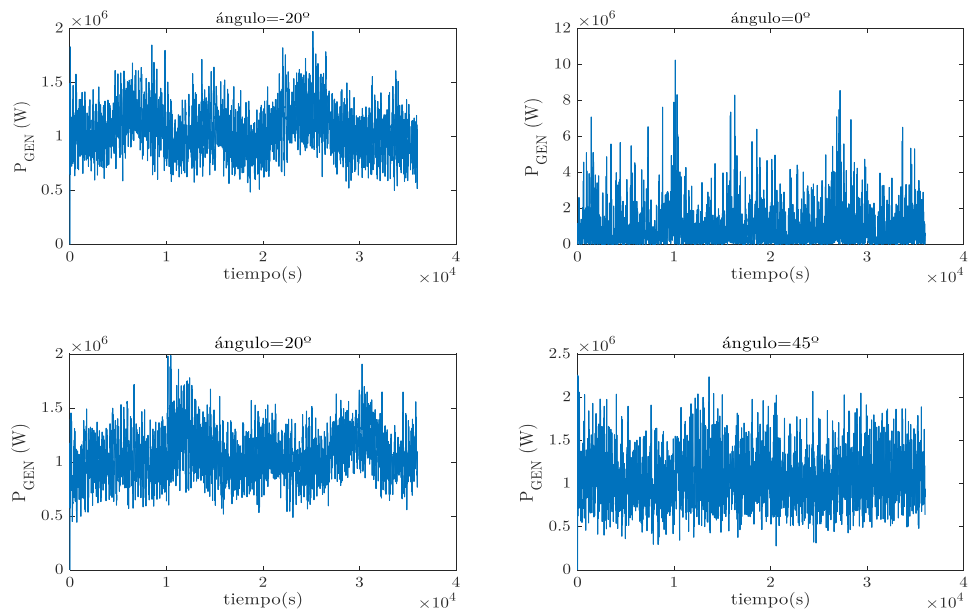


Figura 77. Multigráfica potencia instantánea parque undimotriz variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ).

### 6.2.1.5 Resultados energía generada ( $E_{PARQUE}$ ).

Unido a lo anterior se realizó para los escenarios con una potencia instalada de 50MW una evaluación de la energía total generada por cada parque de generación undimotriz comparando los valores obtenidos por grupos según las variables estudiadas. En la Figura 78 se resumen los resultados obtenidos para la energía (MWh) según se ha variado el recurso del oleaje, el n° de filas y el ángulo de incidencia.

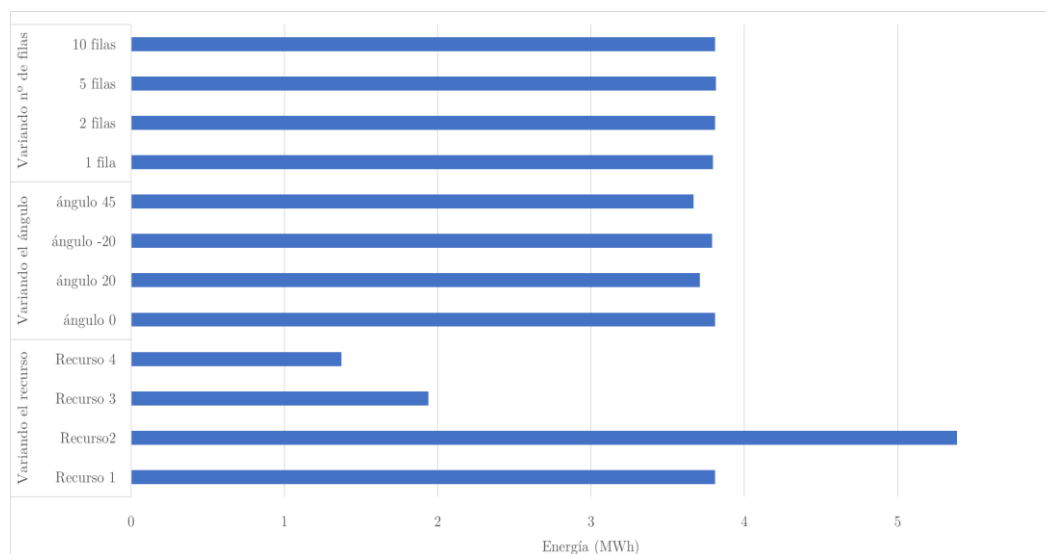


Figura 78. Energía total generada (MWh) para diferentes escenarios de parque de generación undimotriz.

De la Figura 78 se concluye que, aunque las características del perfil de potencia del parque presentan diferencias significativas cuando se varían las variables de distribución espacial del parque, la energía generada por los parques es prácticamente la misma independientemente del valor de dichas variables.

Sin embargo, en el caso del recurso del oleaje se observa que a diferentes estados de mar la energía generada por el parque presenta cambios significativos, en especial en caso del recurso 2 ( $H_s= 2,5m$  y  $T_p=12$  s) donde la energía generada por el parque es mayor que en los otros casos.

A continuación, en el siguiente apartado se procede a la integración de los perfiles de potencia obtenidos para cada escenario de generación en el modelo de red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia.

### 6.3 Simulaciones en el Modelo de Red Eléctrica Débil.

Una vez obtenidas los diferentes perfiles de potencias generadas por los diferentes parques undimotriz en función del escenario de simulación establecidos, se procede a su integración en el modelo de la red eléctrica débil en el régimen de la frecuencia cuyas características principales se han resumido en el Capítulo 5 de la tesis doctoral.

Para la realización de las simulaciones se establecen diferentes estados de operación de la red. Variando aspectos como los valores correspondientes a la inercia del sistema o la contribución de potencia por generación convencional y por generación renovable establecida por el *TSO* para cubrir la demanda prevista.

Como resultado se obtiene el perfil de comportamiento de la frecuencia de red (Hz) en función del perfil de potencia entregada a red por el parque de generación undimotriz y el estado de la red eléctrica débil, así como el perfil de evolución del *ROCOF* (Hz/s).

A partir del perfil de comportamiento de la frecuencia de red se cuantifican los valores que se encuentran fuera del estado normal de operación (desviaciones de frecuencia) en base a los códigos de red proporcionados por el *TSO* para redes eléctricas débiles o insulares. También se cuantifican cuáles de esos valores son eventos son en estado de alerta y emergencia del sistema.

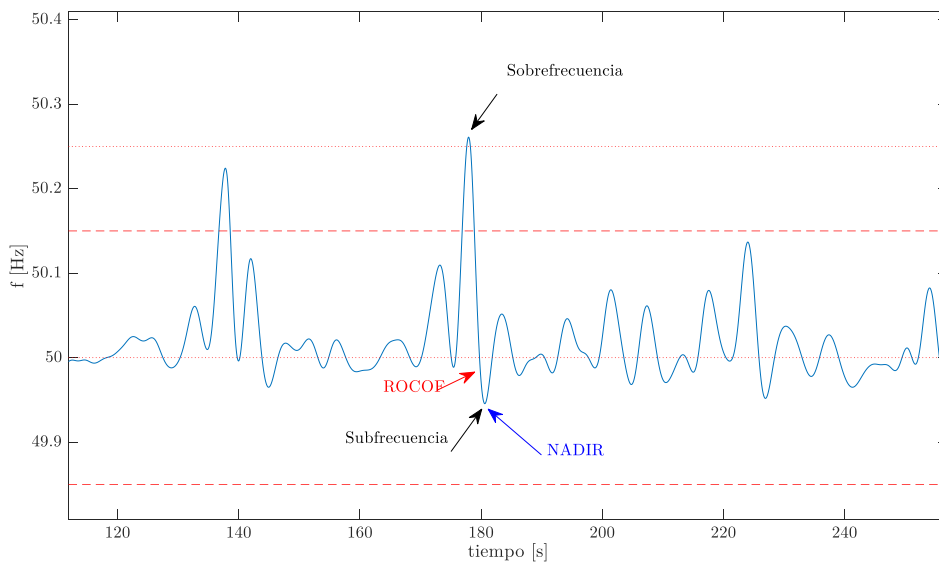


Figura 79. Perfil de desviaciones en comportamiento de la frecuencia con sus parámetros característicos para un escenario parque de generación undimotriz en el sistema eléctrico débil isla de Tenerife.

En la Figura 79 se ve ampliado el perfil de comportamiento tipo de la frecuencia de red. Se identifican de manera clara los parámetros característicos (ROCOF y NADIR) del perfil ante una desviación del valor establecido para la frecuencia (50Hz) así como los estados en subfrecuencia y sobrefrecuencia que en el caso ejemplo que se grafica superan en el caso de la sobrefrecuencia el estado denominado estado de emergencia del sistema y el caso de la subfrecuencia el estado de alerta.

### 6.3.1 Simulaciones en Modelo de Red Eléctrica Débil de la isla de Tenerife.

En el presente apartado se resumirán los resultados de las simulaciones realizadas en el modelo de la red eléctrica débil de la isla de Tenerife ante la integración de los diferentes escenarios de generación desarrollados.

Recordemos que se han generado múltiples escenarios del parque de generación undimotriz en función de una serie de variables que han generado múltiples perfiles de potencia generada por estos parques. Se han integrado el modelo de red eléctrica débil el total de escenarios de simulación obteniendo el perfil de comportamiento de la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife, cuantificando el n° total de eventos fuera del estado normal de operación del sistema: subfrecuencias, sobrefrecuencias, estados en alerta y estados en emergencia (ver Anexo Capítulo 6).

Como modelo de red de la isla de Tenerife se ha tomado el desarrollado en el Capítulo 5 de la presente tesis doctoral y se establecieron diferentes estados de operación de la red eléctrica de la isla de Tenerife, en base a los datos recopilados en la página de REE dedicada al seguimiento de la demanda de la energía eléctrica para la isla de Tenerife, en donde se especifican los valores demanda-generación (convencional y renovable) [125] y las características del sistema eléctrico de la isla de Tenerife a horizonte 2020 [35] (ver Anexo Capítulo 6). Se tomaron diferentes estados de operación en función de la participación de la generación convencional y la generación renovable a la cobertura de la demanda, que darán lugar a variaciones en la inercia del sistema eléctrico, variable a considerar a la hora del estudio del comportamiento de la frecuencia de red como se expuso en el Capítulo 1 dedicado al marco teórico.

$P_{\text{CONVENCIONAL}}$ (MW)	$P_{\text{RENOVABLE}}$ (MW)	Inercia Sistema (s)
450	100	75
350	200	58,8
280	270	46,6
250	300	41,6

Tabla 13. Tabla escenarios operación red eléctrica de Tenerife en función de la participación generación convencional y renovable a la cobertura de la demanda.

Los valores expuestos en la Tabla 13 corresponden al estado inicial del sistema eléctrico de la isla de Tenerife por lo tanto en los MW destinados a la potencia de generación renovable no se incluyen los referentes a la potencia instalada de energía undimotriz en el sistema que se integrarán posteriormente modificando la potencia por generación renovable.

Se han establecido también en el modelo para las simulaciones de red, los valores de los límites establecidos por el TSO español (REE) para los sistemas eléctricos insulares y que definen los rangos en los que la frecuencia se encuentran fuera del estado normal de operación en especial los límites que definen cuando el sistema eléctrico se encuentra en estado de alerta o emergencia (ver Figura 20 Capítulo 1).

En la Figura 80 se representan el perfil de frecuencia para la isla de Tenerife sin la integración de parque de generación undimotriz y con la integración, en concreto 10MW (1 parque de 50 WECs) de potencia instalada de energía undimotriz. Como se observa la integración de generación renovable undimotriz genera desviaciones en la frecuencia de red significativas. En la gráfica de comportamiento de la frecuencia se representan los límites establecidos por el TSO español (REE) fuera del estado normal de operación, estableciendo los rangos en los que dichos eventos se consideran en estado de alerta y de emergencia.

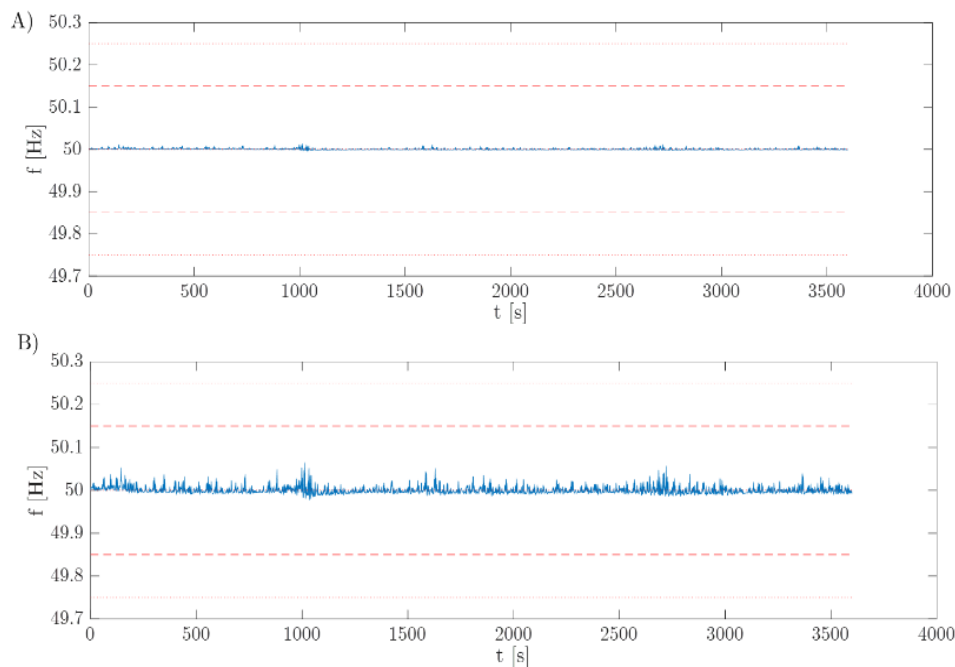


Figura 80. Perfil de comportamiento de la frecuencia de red para la isla de Tenerife  $P_{CON} = 350MW$  A) Sin generación renovable undimotriz B) Con 10 MW de generación renovable undimotriz.



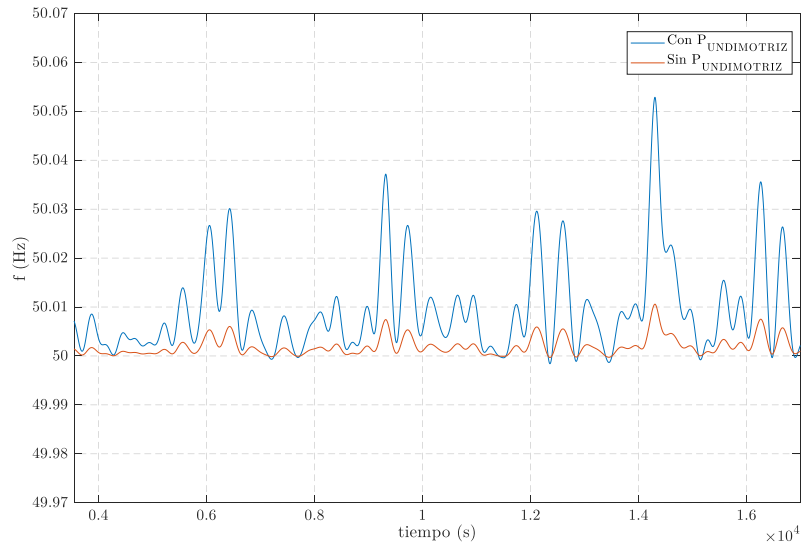


Figura 81. Perfil de comportamiento de la frecuencia de red para la isla de Tenerife  $P_{CON} = 350\text{MW}$ . Sin generación renovable undimotriz y con 10 MW de generación renovable undimotriz. Ventana ampliada.

En la Figura 82 se ha graficado a modo de ejemplo el perfil de la evolución de la potencia de un escenario de parque undimotriz ( $P_{PARQUE} = 50\text{MW}$ ,  $H_s = 2,5\text{ m}$ ,  $T_p = 12\text{s}$ ,  $n^\circ\text{filas} = 2$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) frente al perfil de comportamiento de la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife ( $P_{CON} = 350\text{ MW}$ ).

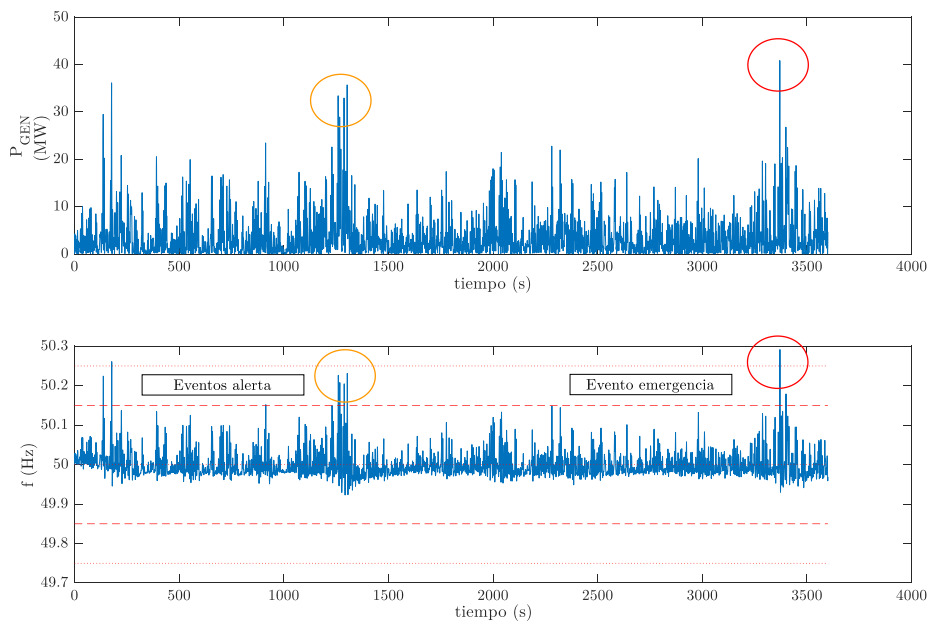


Figura 82. Representación de la potencia generada y perfil de comportamiento de la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife para el caso ejemplo.

Como se observa en la gráfica ejemplo de la Figura 82 existen eventos fuera del estado normal de operación del sistema llegando incluso a existir eventos en estado de emergencia del sistema cuando la característica de la potencia del parque de generación presenta picos pronunciados de generación.

Del total de escenarios simulados 1280 (256 escenarios por cada escenario de potencia instalada de 1 a 5 parques) (ver Anexo Capítulo 6) un total de 942 escenarios el 73,59 % no presenta eventos fuera del estado normal de operación, mientras que 338 escenarios el 26,40% sí que presenta eventos fuera del estado normal de operación, es decir valores fuera de los límites (desviaciones de frecuencia) establecidos por el TSO (REE) para los sistemas eléctricos insulares. De estos 338 escenarios que sí presentan desviaciones de frecuencia un total de 79 escenarios el 23,37% presentan estados del sistema en alerta. De estos 79 escenarios en estado de alerta, 39 escenarios presentan también estados de emergencia del sistema, los cuales representan un 46,36% de los escenarios de alerta, un 11,53% del total de escenarios que presentan desviaciones de frecuencia.

A continuación, se grafican los escenarios más significativos del conjunto de las simulaciones realizadas y que son de interés en el presente estudio de estabilidad de la frecuencia de red ante la integración de energía undimotriz.

### 6.3.1.1 Resultados perfil de frecuencia variando la potencia instalada.

Los resultados de los perfiles de frecuencia generada por el parque undimotriz en el caso de variar la potencia instalada se representan en este subapartado.

Se han cuantificado el número de eventos fuera del estado normal de operación del sistema (desviaciones de frecuencia) por tipo de evento (ver Tabla 14) para el total de los escenarios planteados en el apartado de generación de perfiles de potencia de parque de generación undimotriz.

Potencia (MW)	Desviaciones frecuencia	Subfrecuencias	Sobrefrecuencias	Alerta	Emergencia
10	27910	0	27910	0	0
20	186357	1442	179912	4871	132
30	361084	18901	429332	27222	2624
40	953597	135462	970798	81769	16152
50	1468202	266458	1201744	111343	26867

Tabla 14. Resultados desviaciones de frecuencia por potencia instalada de parque de generación undimotriz.

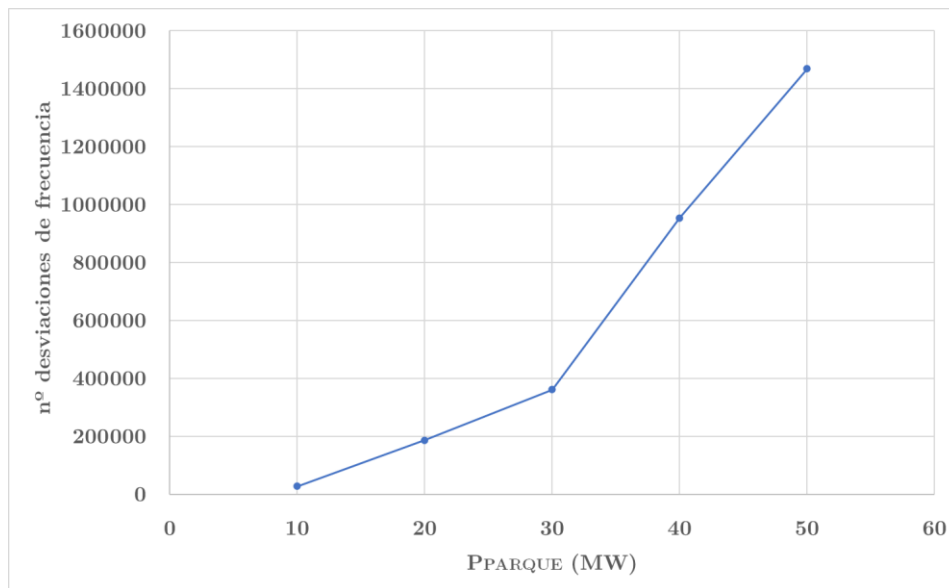


Figura 83. Resultados desviaciones de frecuencia por potencia instalada de parque de generación undimotriz.

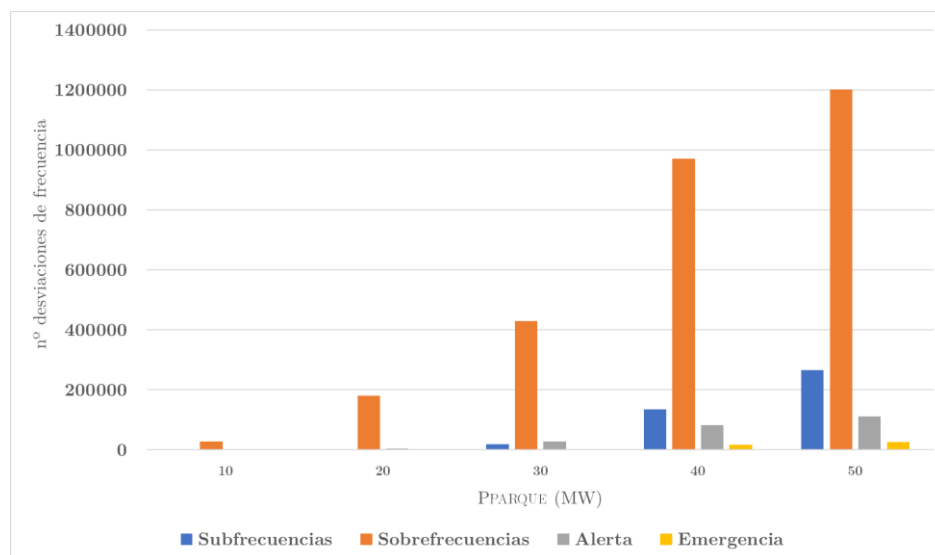


Figura 84. Resultados desviaciones de frecuencia por tipo de evento para diferentes potencias instaladas de parque de generación undimotriz.

Como se observa en la Figura 83 a partir de un determinado valor de potencia instalada para el parque de generación undimotriz aparece un punto de inflexión en la curva (valor 30MW) a partir del cual las desviaciones de frecuencia aumentan de manera significativa hasta el siguiente escalón de potencia instalada (40MW). También es a partir de 30MW donde aparecen los primeros casos de eventos en estado de alerta del sistema eléctrico, siendo el escalón de 40MW cuando aparecen los primeros eventos en emergencia. Para un valor de potencia instalada de 50MW se produce un aumento gradual de eventos fuera

del estado normal del sistema en todos sus tipos, en especial eventos en estado de emergencia.

En vista de los resultados obtenidos con respecto a los perfiles de comportamiento de la frecuencia se tomará para el resto del estudio una potencia instalada de parque de generación undimotriz de 50MW equivalente a 5 parques de 50WECs al ser esta potencia la que presenta un alto % de casos de desviaciones de frecuencia, en especial de casos en estado de alerta y emergencia.

### 6.3.1.2 Resultados perfil de frecuencia variando el recurso undimotriz.

Se grafican los resultados de los perfiles de comportamiento de la frecuencia de red ante la integración de perfiles de potencia instantánea de parque de generación undimotriz obtenidos de escenarios que presentan diferentes estados de oleaje. Para la representación gráfica y a efectos de realizar una comparativa entre los perfiles obtenidos se han tomado los perfiles de frecuencia solución tomando como perfiles de potencia de parque de generación los perfiles solución obtenidos en el apartado de generación de potencias variando el recurso undimotriz con una potencia instalada 50 MW (5 parques de 50 WECs), cada uno de ellos con un ángulo de orientación  $0^\circ$  y  $n^\circ$  de filas de parque igual a 2, se ha tomado como escenario de comportamiento para la red eléctrica de la isla de Tenerife como valor de  $P_{CONV} = 350$  MW.

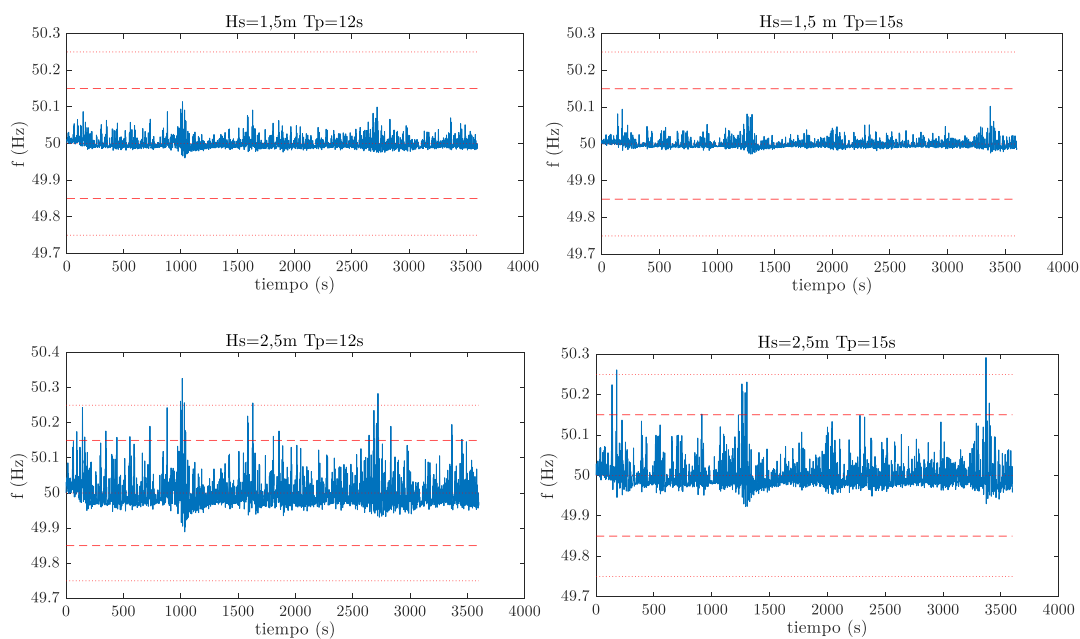


Figura 85. Multigráfica perfiles de comportamiento de la frecuencia para un mismo parque de generación sometido a diferentes condiciones de recurso del oleaje.

Como se puede observar en la Figura 85 los perfiles de comportamiento de la frecuencia de red eléctrica débil de Tenerife resultado de la integración de potencias parques de generación de características comunes sometidos a diferentes recursos del oleaje presentan diferencias significativas. En todos los casos se producen eventos fuera del estado normal de operación, pero en el caso de potencias de generación pertenecientes a estados de oleaje más significativos se observa la aparición de eventos en estado de alerta y emergencia del sistema eléctrico.

### 6.3.1.3 Resultados perfil de frecuencia variando el $n^\circ$ de filas.

Se grafican los resultados de los perfiles de comportamiento de la frecuencia de red ante la integración de perfiles de potencia instantánea de parque de generación undimotriz obtenidos de escenarios que presentan diferente distribución espacial en el mar variando el  $n^\circ$  de filas de parque. Para la representación gráfica y a efectos de realizar una comparativa entre los perfiles obtenidos se han tomado los perfiles de frecuencia tomando como perfiles de potencia de parque de generación los perfiles solución obtenidos en el apartado de generación de potencias variando el  $n^\circ$  de filas con una potencia instalada 50 MW (5 parques de 50 WECs), cada uno de ellos con un recurso undimotriz de  $H_s=2,5$  m y  $T_p=12$  s, ángulo de orientación  $0^\circ$ , se ha tomado como escenario de comportamiento para la red eléctrica de la isla de Tenerife como valor de  $P_{CONV} = 350$  MW.

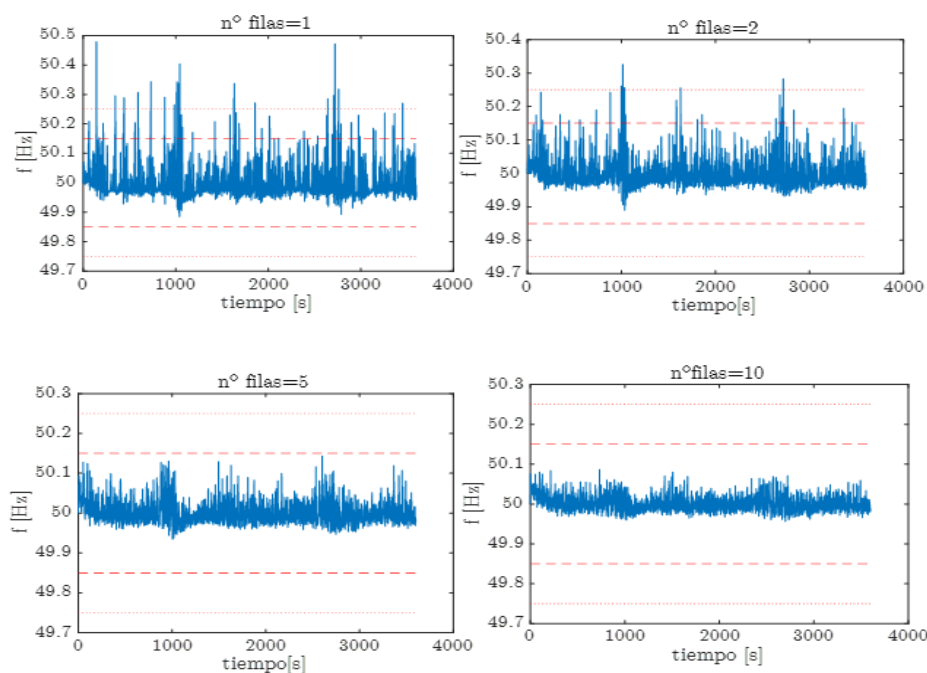


Figura 86. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando el  $n^\circ$  de filas.

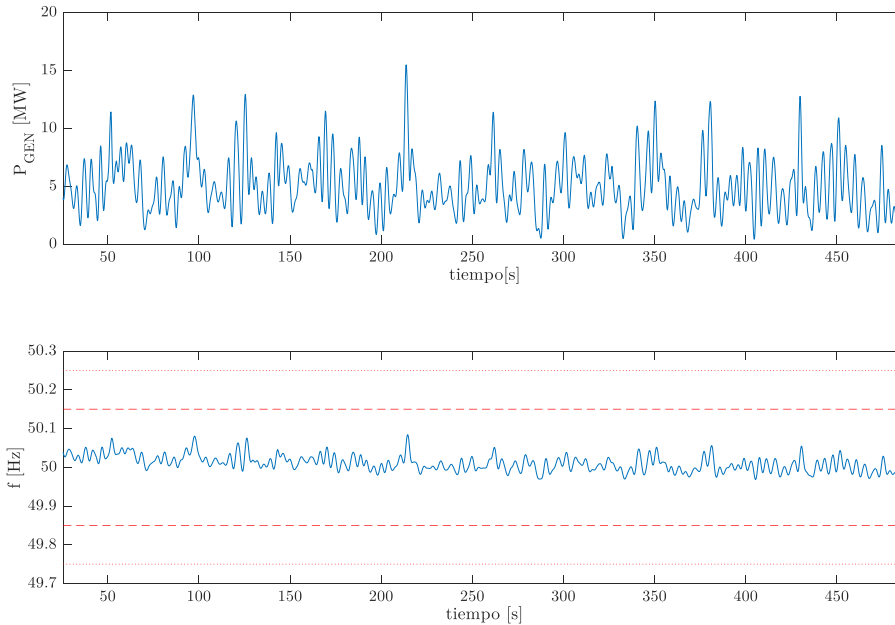


Figura 87. Representación potencia instantánea generada por un parque undimotriz de 10 filas y perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife. Ventana temporal reducida.

Se observa en la Figura 86 que los perfiles de comportamiento de la frecuencia que presentan mayor número de eventos fuera del estado normal de operación del sistema (desviaciones de frecuencia) son aquellos que presentan un nº de filas menor de parque de generación. Para distribuciones poco malladas de parque (1 fila, 2 filas) aparecen un mayor número de desviaciones de frecuencia presentándose casos de eventos en estado de alerta y emergencia muy significativos (ver caso nº filas = 1).

Por otro lado, para distribuciones malladas (5 filas, 10 filas) encontramos un alisado del perfil de frecuencia del sistema eléctrico desapareciendo los eventos en estado de alerta y emergencia, obteniendo un perfil de frecuencia para el sistema eléctrico de la isla de Tenerife más estable cumpliendo con los requisitos establecidos por el TSO.

Es importante recordar que, aunque el perfil de potencia para los diferentes casos de distribución en función del número de filas de parque de generación varía dando lugar a diferentes perfiles de comportamiento de la frecuencia la energía total extraída por cada parque de generación es prácticamente la misma para los 4 casos (ver Figura 78 ).

#### 6.3.1.4 Resultados perfil de frecuencia variando el ángulo de orientación.

Se grafican los resultados de los perfiles de comportamiento de la frecuencia de red ante la integración de perfiles de potencia instantánea de parque de generación undimotriz obtenidos de escenarios que presentan diferente distribución espacial en el mar variando el ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha$ ). Para la representación gráfica y a efectos de realizar una comparativa entre los perfiles obtenidos se han tomado los perfiles de frecuencia

solución tomando como perfiles de potencia de parque de generación los perfiles solución obtenidos en el apartado de generación de potencias variando el ángulo  $\alpha$  con una potencia instalada 50 MW (5 parques de 50 WECs), cada uno de ellos con un recurso undimotriz de  $H_s=2,5$  m y  $T_p=12$  s,  $n^\circ$  filas = 2, se ha tomado como escenario de comportamiento para la red eléctrica de la isla de Tenerife como valor de  $P_{CONV} = 350$  MW.

Se observa en la Figura 88 los perfiles de comportamiento de la frecuencia que presentan mayor número de eventos fuera del estado normal de operación del sistema (desviaciones de frecuencia) son aquellos que presentan un ángulo de orientación con cierta inclinación ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $\alpha=-20^\circ$ ,  $\alpha= 45^\circ$ ). Para distribuciones de parque con un ángulo de orientación perpendicular al frente de ola ( $\alpha = 0^\circ$ ) aparecen un mayor número de desviaciones de frecuencia presentándose casos de eventos en estado de alerta y emergencia muy significativos (ver caso  $\alpha = 0^\circ$ ).

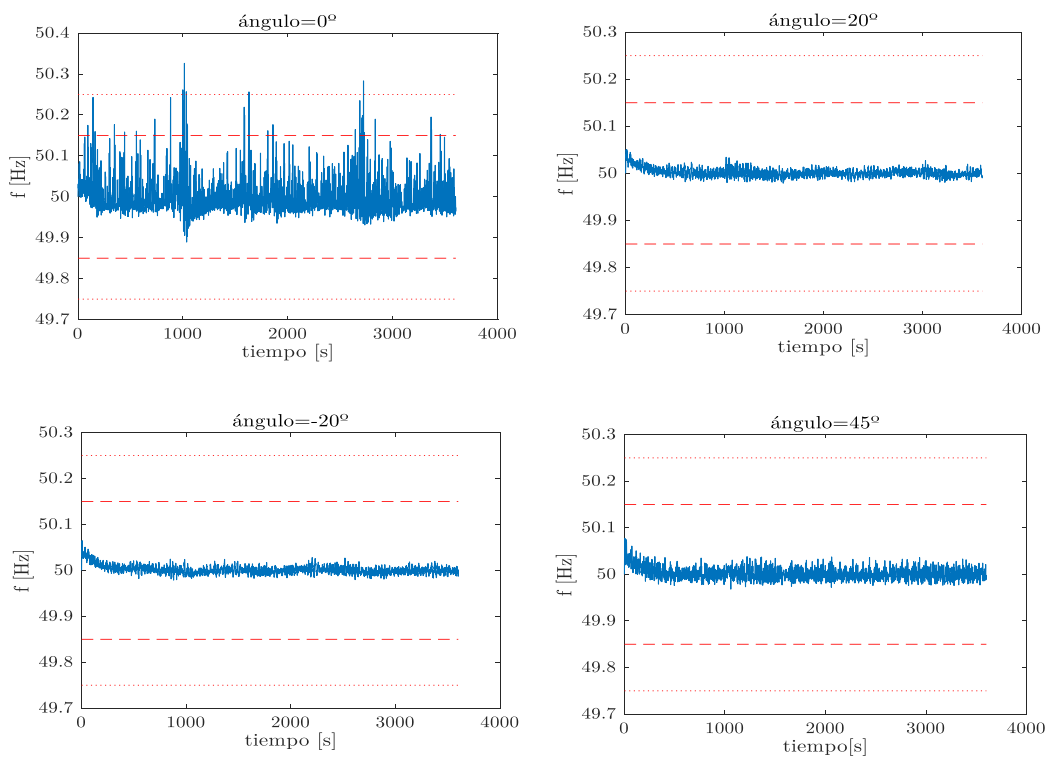


Figura 88. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando  $\alpha$ .

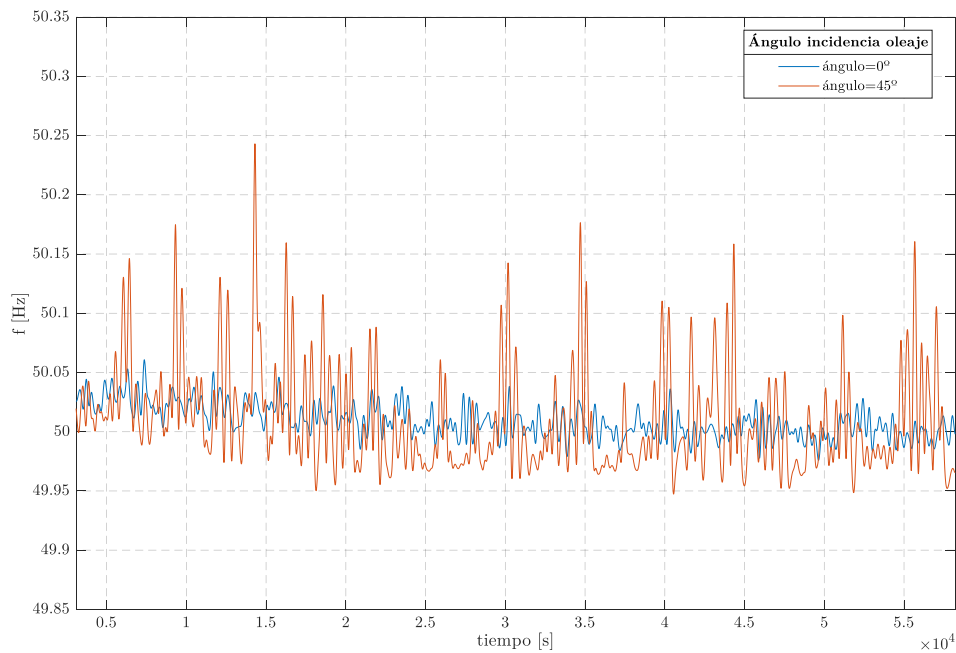


Figura 89. Perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando  $\alpha$ . Ventana temporal reducida.

Es importante recordar que, aunque el perfil de potencia para los diferentes casos de distribución en función del ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) de parque de generación varía dando lugar a diferentes perfiles de comportamiento de la frecuencia la energía total extraída por cada parque de generación es prácticamente la misma para los 4 casos (ver Figura 78 ).

#### 6.3.1.5 Resultados perfil de frecuencia variando estados de la red eléctrica débil.

Para la realización de los múltiples escenarios también se plantearon distintos escenarios de operación del sistema eléctrico de la isla Tenerife. Estos escenarios se plantearon aumentando o disminuyendo la contribución a la cobertura de la demanda por parte de la generación renovable presente en la isla (solar y eólica). Esta variación repercute directamente a la participación de la generación convencional y por la tanto a la inercia del sistema eléctrico que es un factor determinante en el procedimiento de regulación primaria del sistema.

En la Figura 90 se observan distintos perfiles de comportamiento de la frecuencia de la red de la isla de Tenerife para distintos escenarios de operación de la red. Se observa que a menor inercia del sistema mayores eventos fuera del estado normal de operación se presentan.



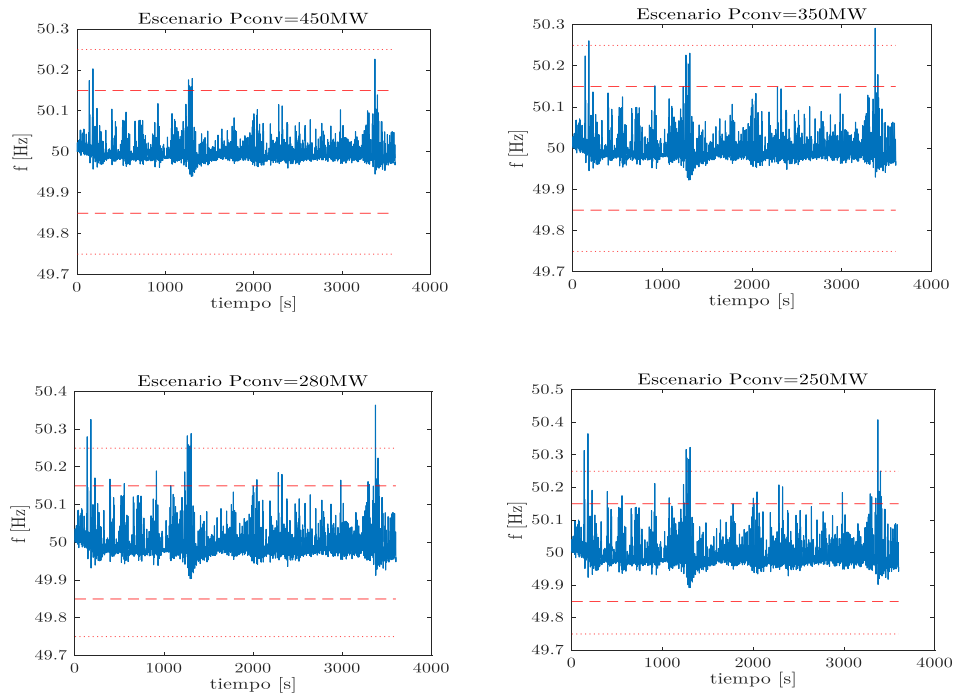


Figura 90. Multigráfico perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes escenarios de parque undimotriz variando  $P_{conv}$ .

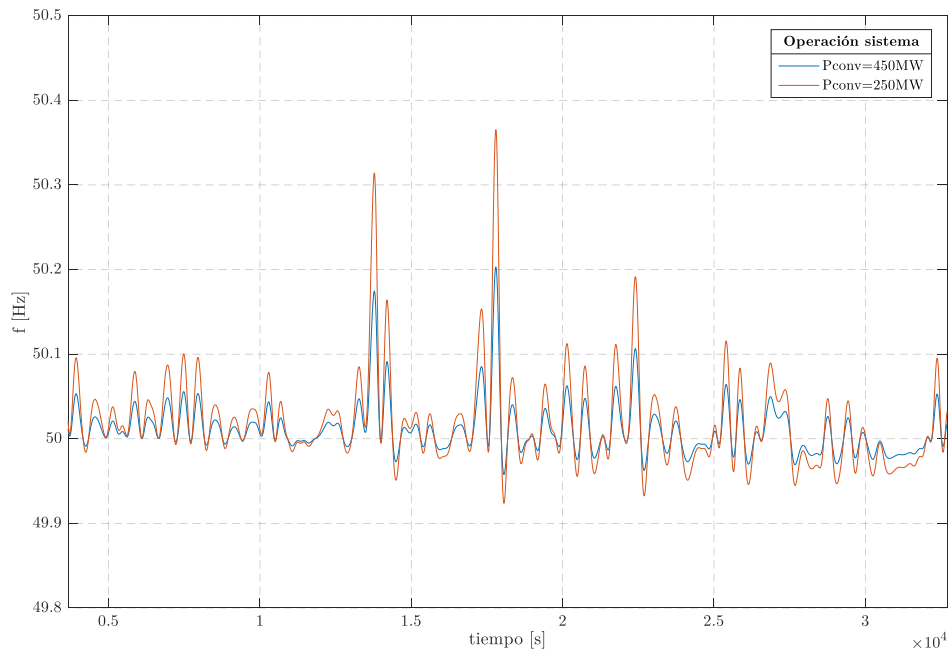


Figura 91. Perfil de comportamiento frecuencia red para la isla de Tenerife para diferentes estados de operación del sistema. Ventana temporal reducida.

Como se observa en la Figura 90 y Figura 91 existe un suavizamiento del perfil de comportamiento de la frecuencia cuando la participación de la generación convencional

en el sistema es mayor (mayor inercia) pero, aunque exista ese suavizamiento el perfil sigue presentando picos pronunciados fuera del estado normal de operación en diversos instantes del rango de operación.

### 6.3.1.6 Resultados perfil comportamiento del ROCOF (Hz/s).

Además de los rangos de operación establecidos fuera del estado normal de operación por el TSO también se ha evaluado como parámetro que determina la estabilidad de la frecuencia de red el ROCOF (Hz/s). Recordemos que según lo establecido por el operador del sistema REE para los sistemas eléctricos insulares (redes eléctricas débiles) la tasa de cambio de frecuencia o ROCOF(Hz/s) debe permanecer en  $\pm 2$  Hz/s (Tabla 5). Tomando como base para el cálculo la Ecuación 5 se ha procedido a evaluar este parámetro en un escenario donde existan eventos fuera del estado normal de operación para ver si también aparecen valores no permitidos para el ROCOF.

Como se observa en la Figura 92 el perfil de comportamiento del ROCOF para el escenario seleccionado no presenta valores fuera del límite establecido por el operador del sistema cumpliendo con lo requerido en los códigos de red.

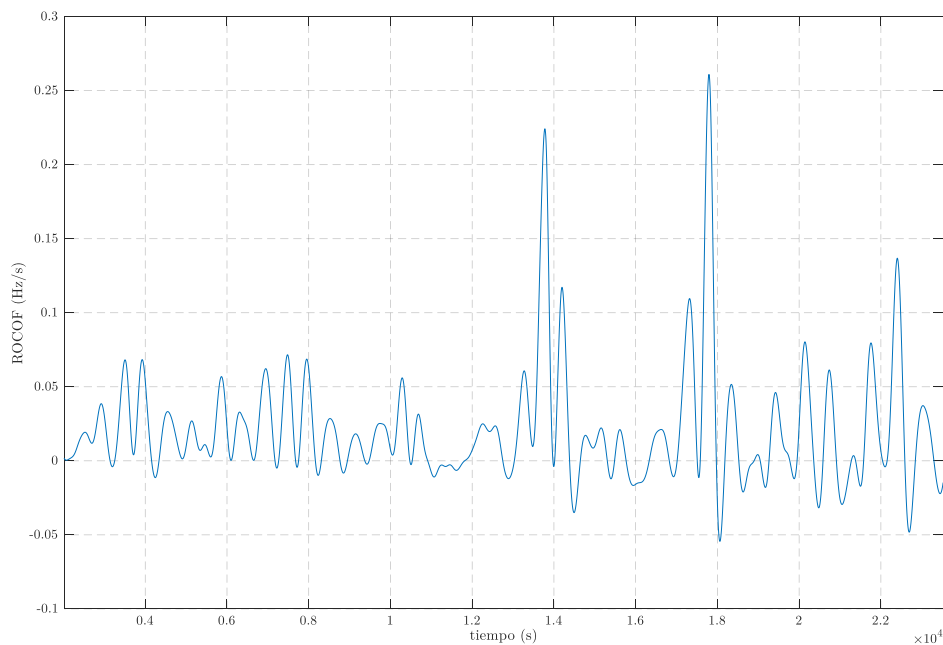


Figura 92. Perfil de comportamiento del ROCOF para un escenario de parque de generación undimotriz en la red eléctrica de Tenerife.

## 6.4 Análisis Estadístico de Resultados.

Como resultado de este análisis gráfico de los resultados se concluye la necesidad de realizar un análisis estadístico de resultados con el objetivo de establecer la relación entre las variables de entrada al modelo vinculadas al parque undimotriz y a la red eléctrica débil con la aparición desviaciones en la frecuencia de red y por lo tanto la aparición de eventos fuera del estado normal de operación del sistema eléctrico.

Para la realización del análisis estadístico se aplicarán técnicas de análisis multivariante (Figura 93).

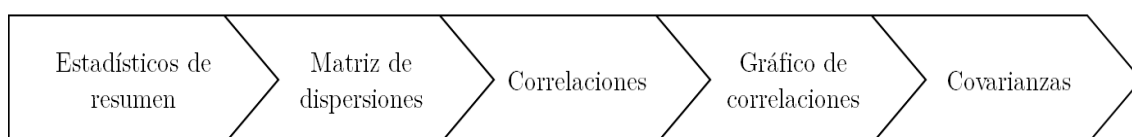


Figura 93. Técnicas de Análisis Multivariante desarrolladas. Fuente: elaboración propia a partir de [126].

También se aplicará el procedimiento de análisis regresión lineal para un caso concreto de escenario de generación. Este análisis tiene como objetivo el analizar la relación entre el perfil de evolución de la potencia instantánea y el perfil de evolución de desviaciones de frecuencia de la red eléctrica débil, obteniendo un modelo ajustado entre ambas variables.

Los conceptos teóricos más importantes de estas técnicas utilizadas y que son de interés para la comprensión de los resultados obtenidos en el análisis estadístico se resumen en el Anexo del Capítulo 6.

Como herramienta para el análisis de resultados se utiliza la herramienta computacional de análisis estadístico STATGRAPHICS Centurion XVIII [127].

### 6.4.1 Resultados análisis multivariante. Caso general.

El análisis multivariante para el caso general se realiza a partir de los resultados obtenidos del total de los 256 escenarios simulados obtenidos de las diferentes configuraciones de parque de generación undimotriz para el caso de una potencia instalada de 50MW (5 parques undimotriz) (ver Tabla 5 del Anexo del Capítulo 6).

El análisis multivariante de los resultados del caso general tiene como objetivo establecer si existe relación entre las variables de los escenarios (recurso undimotriz, n<sup>o</sup> de filas, ángulo  $\alpha$ , estado de la red eléctrica débil) y la aparición de eventos fuera del estado normal de operación (desviaciones de frecuencia).

El análisis multivariante se realiza tomando como variables de entrada las relacionadas con el parque de generación undimotriz y la red eléctrica de la isla de Tenerife y los eventos totales fuera del estado normal de operación del sistema.

#### 6.4.1.1 Resumen estadístico.

La Tabla 15 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye las medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma.

	<i>Hs(m)</i>	<i>Tp(s)</i>	<i>Ángulo</i>	<i>n°filas</i>	<i>Pconv</i>	<i>Energía</i>	<i>Eventos</i>
<i>Recuento</i>	256	256	256	256	256	256	256
<i>Promedio</i>	2,0	13,5	0,60354	4,5	332,5	92,9354	5735,16
<i>Desviación Estándar</i>	0,500979	1,50294	0,36243	3,50686	77,0841	47,249	16201,7
<i>Coefficiente de Variación</i>	25,049%	11,1329%	60,0506%	77,9301%	23,1832%	50,8407%	282,497%
<i>Mínimo</i>	1,5	12,0	0	1,0	250,0	39,64	0
<i>Máximo</i>	2,5	15,0	0,912945	10,0	450,0	161,6	128116,
<i>Rango</i>	1,0	3,0	0,912945	9,0	200,0	121,96	128116,

Tabla 15. Resumen estadístico variables análisis multivariante.

#### 6.4.1.2 Covarianzas.

En la Tabla 16 se muestran las covarianzas estimadas para cada par de variables. Las covarianzas miden qué tanto varían las variables conjuntamente y se utilizan para calcular las correlaciones momento del producto de Pearson.

	<i>Hs(m)</i>	<i>Tp(s)</i>	<i>Ángulo</i>	<i>n°filas</i>	<i>Pconv</i>	<i>Energía</i>	<i>Eventos</i>
<i>Hs(m)</i>	0,25098	0	0	0	0	21,9697	2340,56
<i>Tp(s)</i>	0	2,25882	0	0	0	-23,8488	-2609,56
<i>Ángulo</i>	0	0	0,131355	0	0	-0,203346	-2856,89
<i>n°filas</i>	0	0	0	12,298	0	0,48898	-9159,22
<i>Pconv</i>	0	0	0	0	5941,96	9,15941	-199852,
<i>Energía</i>	21,9697	-23,8488	-0,203346	0,48898	9,15941	2232,47	250605,
<i>Eventos</i>	2340,56	-2609,56	-2856,89	-9159,22	-199852,	250605,	2,62494E8

Tabla 16. Resultado covarianzas.

#### 6.4.1.3 Correlaciones.

En Tabla 17 la se muestra las correlaciones momento producto de Pearson entre cada par de variables. El rango de los coeficientes de correlación va de -1 a +1 y miden la

fuerza de la relación entre las variables. El segundo número en cada bloque de la tabla representa el valor de P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores de P por debajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes a cero con un nivel de confianza del 95%.

	<i>Hs(m)</i>	<i>Tp(s)</i>	<i>Ángulo</i>	<i>n°filas</i>	<i>Pconv</i>	<i>Energía</i>	<i>Eventos</i>
<i>Hs(m)</i>		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9281	0,2884
		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
<i>Tp(s)</i>	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	-0,3358	-0,1072
	1,0000		1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0870
<i>Ángulo</i>	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	-0,0119	-0,4865
	1,0000	1,0000		1,0000	1,0000	0,8500	0,0000
<i>n°filas</i>	0,0000	0,0000	0,0000		0,0000	0,0030	-0,1612
	1,0000	1,0000	1,0000		1,0000	0,9625	0,0098
<i>Pconv</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		0,0025	-0,1600
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		0,9681	0,0103
<i>Energía</i>	0,9281	-0,3358	-0,0119	0,0030	0,0025		0,3274
	0,0000	0,0000	0,8500	0,9625	0,9681		0,0000
<i>Eventos</i>	0,2884	-0,1072	-0,4865	-0,1612	-0,1600	0,3274	
	0,0000	0,0870	0,0000	0,0098	0,0103	0,0000	

Tabla 17. Resultados correlaciones análisis multivariante.

De la Tabla 17 se concluye que existe una relación significativa entre las variables resumidas en la Figura 94.



Figura 94. Resultados análisis multivariante: relación entre variables caso general.

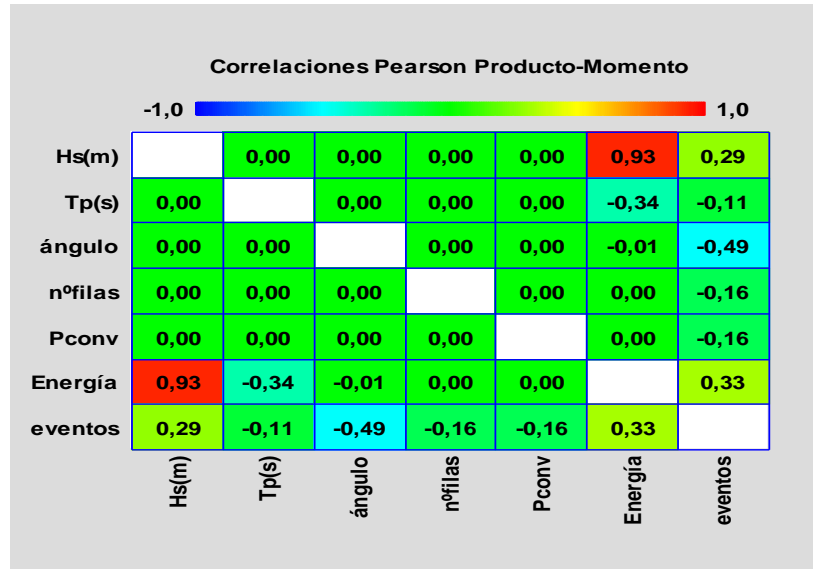


Figura 95. Matriz de correlaciones Pearson Producto. Momento para el total de eventos frecuencia fuera estado normal de operación.

Se concluye de los valores de la matriz de correlaciones Pearson Producto-Momento que la relación significativa entre algunas variables existe. En ningún caso llegan a ser correlaciones perfectas (cuando el coeficiente es igual a 1 o -1), siendo en algunos de los casos muy próximas a cero (no existe relación lineal, pero puede existir otro tipo de relación entre las variables). Se analizan los resultados de los coeficientes valorando la relación entre el resto de las variables y los eventos fuera del estado de operación del sistema eléctrico (desviaciones de frecuencia).

En el caso de la variable Hs (m) relativa al recurso del oleaje y la aparición de eventos de frecuencia fuera del estado normal de operación del sistema eléctrico, con un valor de 0,23 para la correlación Pearson, se concluye la existencia de una correlación positiva. Por lo tanto, se puede concluir que existe dependencia entre ambas variables en relación directa, cuando la Hs (m) aumenta los eventos de desviación de la frecuencia también lo hacen en proporción constante. Este resultado reafirma los resultados resumidos en el análisis gráfico donde a mayor Hs (m) mayores picos de potencia generada por el parque de generación se producían y se veía la aparición de picos en el perfil de comportamiento de la frecuencia de red dando lugar a estados en alerta y emergencia del sistema para valores altos de Hs. Destacar el valor de correlación de 0,93 entre Hs y la energía, siendo un valor muy cercano a 1 de correlación positiva perfecta, este valor reafirma que a mayor Hs mayor energía obtenida por parte del parque de generación.

Para la variable Tp(s) vinculada al recurso undimotriz y los eventos se obtiene un valor de correlación negativa de -0,11, existiendo relación entre ambas variables, pero siendo en este caso inversa cuando aumenta el período de ola Tp (s) disminuyen los eventos fuera del estado normal de operación. En el caso de ángulo  $\alpha$ , nº filas, variables del grupo que determinan la posición espacial del parque de generación en el mar, para ambas

variables existe una correlación inversa entre ellas y los eventos fuera del estado normal de operación del sistema. Cuanto más aumentan los valores para el ángulo o el n° de filas menos eventos fuera del estado de operación aparecen. En el caso del ángulo  $\alpha$  la correlación inversa presenta un mayor grado de dependencia con un valor del coeficiente de Pearson de -0,49.

Para la  $P_{CONV}$ , variable que define el estado de operación del sistema eléctrico en cada escenario, existe una correlación inversa entre ella y los eventos fuera del estado normal de operación, siendo el valor del coeficiente de Pearson -0,16, siendo por lo tanto el grado de dependencia moderado.

#### 6.4.2 Resultados análisis regresión lineal. Caso particular.

Del conjunto de escenarios analizados en el caso general (ver apartado) se ha seleccionado un escenario concreto (caso particular) al cual se ha realizado un análisis de regresión lineal con el objetivo de obtener una relación directa entre la potencia generada y las desviaciones de frecuencia obtenidas en este caso concreto de red. Se ha seleccionado un escenario que presentará un número significativo de eventos fuera del estado normal de operación del sistema (desviaciones de frecuencia (Hz)). El objetivo del análisis de regresión lineal es el de establecer qué relación existe entre el perfil de potencia generada por el parque de generación (valores p.u) y el perfil de desviaciones de frecuencia resultante de la integración de dicha potencia en la red eléctrica débil. Si la relación entre ambas variables fuera significativa como resultado del análisis de regresión lineal se obtendrá la recta de ajuste estableciendo una expresión (ecuación matemática) entre ambas variables.

Se ha tomado como caso particular el perfil de frecuencia de un escenario de parque de generación undimotriz que presenta una  $P_{PARQUE} = 50\text{MW}$ ,  $H_s = 2,5$  m,  $T_p = 12$  s, n° filas = 2,  $\alpha = 0^\circ$  y con un estado del sistema eléctrico con  $P_{CONV} = 350\text{MW}$ . Como parámetros de la simulación se ha tomado como tiempo total de la ventana temporal 3600 s, registrando el valor para la frecuencia de la red eléctrica para la isla de Tenerife cada 0,01 s, obteniendo de esta forma un conjunto de datos aceptable para la obtención de la recta ajuste del modelo de regresión lineal.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<i>Modelo</i>	206,711	1	206,711	439442,45	0,0000
<i>Residuo</i>	169,341	359999	0,000470393		
<i>Total (Corr.)</i>	376,052	360000			

Tabla 18. Tabla resultado análisis caso particular.

- Coeficiente de Correlación = **0,741409**
- R-cuadrada = 54,9687 por ciento
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 54,9686 por ciento
- Error estándar del est. = 0,0216886
- Error absoluto medio = 0,0154226
- Estadístico Durbin-Watson = 0,000147514 (P=0,0000)
- Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,999921

Puesto que el valor-P para el análisis (ver Tabla 18) es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las desviaciones de frecuencia y la potencia generada por el parque undimotriz con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 54,9687% de la variabilidad en desviaciones de frecuencia. El coeficiente de correlación es igual a 0,741409, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0216886.

El error absoluto medio (MAE) de 0,0154226 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

En la Figura 95 se representan gráficamente los valores obtenidos del análisis de regresión lineal para el caso particular para la potencia instantánea generada por el parque de generación caso de estudio junto con el perfil de desviaciones de frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife para cada instante de tiempo.

Se ha realizado el análisis de regresión lineal entre ambas variables dando como resultado la recta de ajuste del modelo (Ecuación 27).

$$\text{Desviaciones\_Frecuencia} = -0,0207904 + 0,706779 * \text{Potencia\_Generada}$$

*Ecuación 27. Ecuación relación desviaciones frecuencia y potencia generada modelo ajuste.*

El Figura 96 muestra de manera clara los límites de los diferentes límites de ocurrencia de estados fuera del estado normal de operación del sistema tanto admisibles como no admisibles por el TSO (eventos alerta y emergencia).



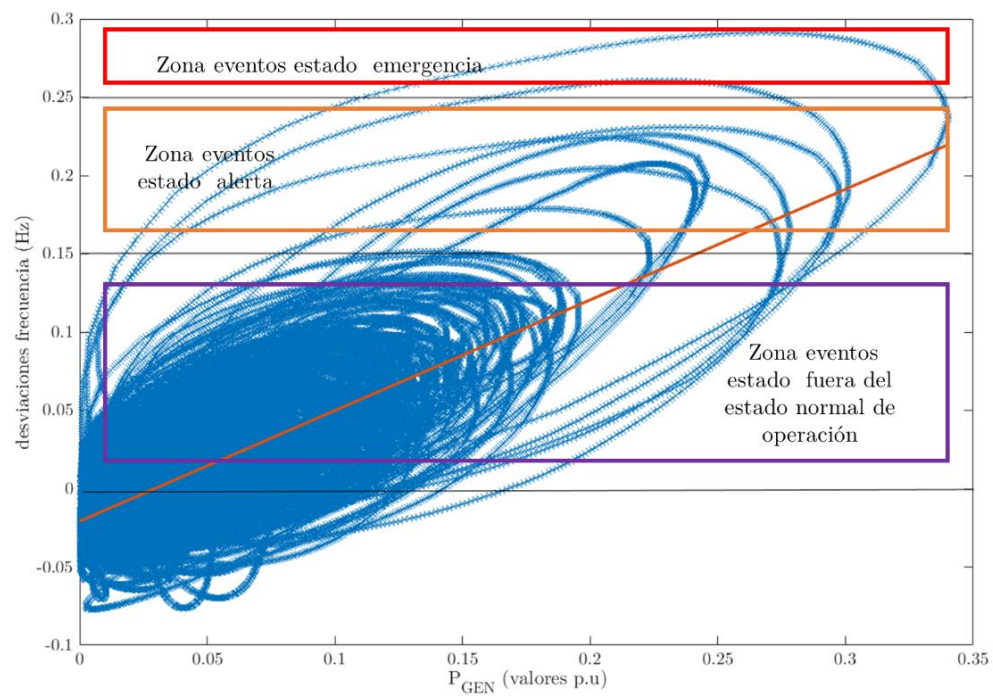


Figura 96. Recta de ajuste y diagrama de dispersión del caso particular.

7

---

## Capítulo 7

---

### 8 Mecanismo de alisado de potencia: sistemas de almacenamiento energético para contribuir a la estabilidad de la frecuencia en redes eléctricas débiles ante la integración de energía undimotriz.

#### 8.1 Introducción.

En el presente capítulo se describirá la integración de un sistema de almacenamiento energético para aplicación en los casos del modelo conjunto objeto de estudio en el análisis de estabilidad de la frecuencia de red ante la integración de un parque de generación undimotriz que han presentado desviaciones de frecuencia y por lo tanto eventos fuera del estado normal de operación del sistema inaceptables para el *TSO*. El objetivo de la integración del sistema de almacenamiento como mecanismo de alisamiento de la potencia instantánea generada por el parque de generación undimotriz, que va a ser entregada a la red eléctrica débil es, el de minimizar el efecto que provocan las oscilaciones de potencia generadas por el parque undimotriz en el comportamiento del perfil de frecuencia de la red eléctrica y en los eventos fuera del estado normal de operación del sistema.

#### 8.2 Integración sistemas de almacenamiento energético.

El mecanismo para el alisamiento de la potencia generada por el parque de generación undimotriz por medio de un sistema de almacenamiento energético se resume en el la Figura 97. La integración se realizará por medio de la herramienta Matlab-Simulink dentro del modelo conjunto utilizado en el análisis de estabilidad de la frecuencia.

Como se observa en la Figura 97 se parte de la potencia de parque undimotriz como variable de entrada al modelo ( $P_{GEN}$ ). Se procede a integrar un sistema de filtrado de  $P_{GEN}$  con el objetivo de obtener un valor de la potencia del parque alisada (power smoothing) a integrar en la red eléctrica débil para que minimice la aparición de desviaciones de frecuencia y por lo tanto la aparición de eventos fuera del estado normal de operación del sistema. La potencia entregada a la red y que se entiende que no producirá desviaciones en la frecuencia se denominará  $P_{GEN\ FILTRADA}$ . Una vez calculada

$P_{\text{GEN FILTRADA}}$  se integrará en el modelo un sistema de almacenamiento con el objetivo de realizar un aprovechamiento adecuado de la generación del parque undimotriz, almacenando la potencia sobrante del proceso de filtrado. Se procede a calcular la potencia a almacenar o potencia de almacenamiento ( $P_{\text{ESS}}$ ), en base a la hipótesis de cuánta potencia debemos almacenar para conseguir el valor de  $P_{\text{GEN FILTRADA}}$  que se sabe que no provoca desviaciones de la frecuencia de red. Como resultado se obtendrán unas necesidades de almacenamiento que no se ajustan a un modelo real de almacenamiento. Para integrar un modelo real de almacenamiento se procede a la limitar la potencia a almacenar ( $P_{\text{ESS LIMITADA}}$ ). Esta limitación se realizará teniendo en cuenta los aspectos tanto técnicos como económicos para dar como resultado una solución viable del sistema de almacenamiento (ESS), encontrando una situación de equilibrio entre la minimización de las desviaciones de frecuencia y el ESS a integrar en el modelo.

A partir de la potencia considerada como consigna,  $P_{\text{GEN FILTRADA}}$ , teniendo en cuenta las limitaciones técnicas del sistema de almacenamiento, queda definida una potencia  $P_{\text{GEN SMOOTHING}}$  que es la que se va a inyectar en la red. Para finalizar se realiza la integración de la potencia del parque undimotriz alisada ( $P_{\text{GEN SMOOTHING}}$ ) en el modelo de la red eléctrica débil objeto del estudio y se realiza el análisis del comportamiento del perfil frecuencia de la red eléctrica débil evaluando el efecto de la integración del ESS en el sistema.

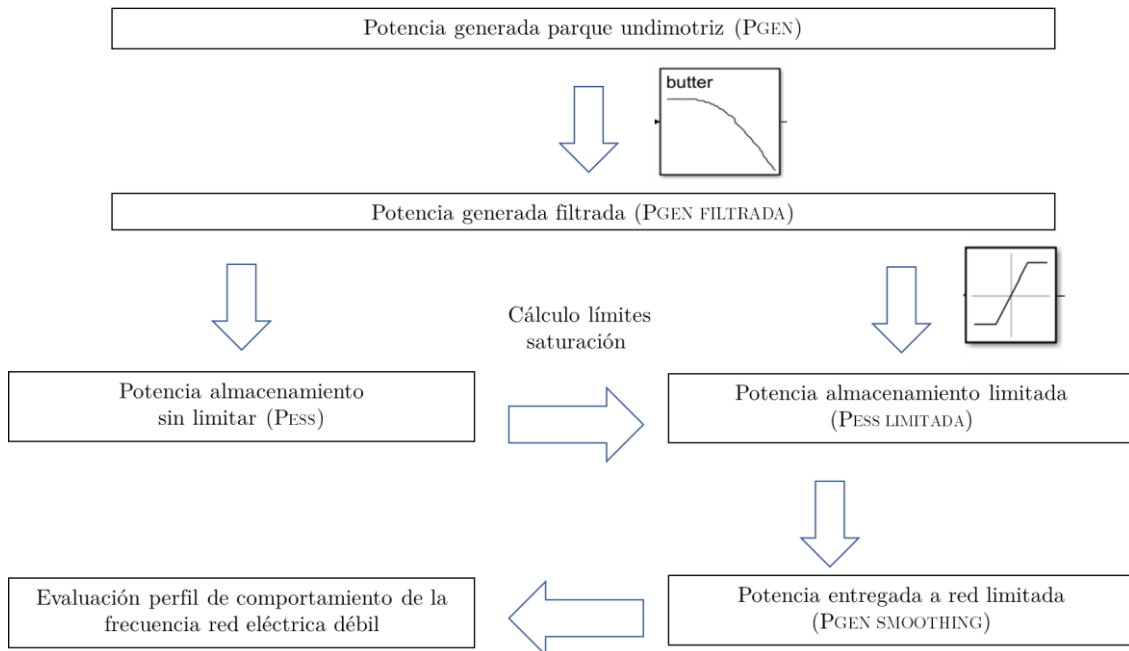


Figura 97. Metodología integración ESS como mecanismo de alisado de potencia (power smoothing). Fuente: elaboración propia.

Para el establecimiento de los parámetros del modelo de alisado se trabajará con los valores del caso de estudio por unidad (p.u) tomando la potencia base del sistema eléctrico débil como valor para la conversión de los valores, pero a efectos de representación gráfica algunos de los resultados se han realizado en la unidad de potencia (MW) para una mejor comprensión de los resultados.

### 8.2.1 Filtrado potencia instantánea parque de generación undimotriz ( $P_{GEN}$ ).

En primer lugar, se realizará un filtrado de la potencia instantánea ( $P_{GEN}$ ). Se integrará al sistema un filtro tipo Butterworth de paso bajo [128], el cual por definición dejará pasar valores por debajo del ancho de banda que se establezca. Se establecerá el ancho de banda que mejor se adapte a la característica de  $P_{GEN}$  buscando que dicho valor dé como resultado un valor de  $P_{GEN\ FILTRADA}$  de tal manera que al ser integrada en la red eléctrica débil no provoque desviaciones de la frecuencia de red y por lo tanto minimice los eventos fuera del estado normal de operación del sistema.

Este valor de  $P_{GEN\ FILTRADA}$  servirá de base para el cálculo de la potencia a almacenar ( $P_{ESS}$ ) ya que proporcionará el valor de  $P_{GEN}$  que debemos de almacenar para que no se produzcan eventos fuera del estado normal de operación del sistema (Ecuación 28).

$$P_{ESS} = P_{GEN} - P_{GEN\ FILTRADA}$$

*Ecuación 28. Ecuación aplicación filtrado potencia para cálculo  $P_{ESS}$ .*

Para la determinación aproximada del valor del ancho de banda a aplicar para el filtro Butterworth se hará uso de los resultados obtenidos en el estudio de regresión lineal realizado para el análisis de la estabilidad en un caso particular en donde se estableció mediante la recta de regresión lineal del modelo la relación entre las desviaciones de frecuencia (Hz) y el perfil de potencia generada por el parque de generación undimotriz (Ecuación 27).

Para la obtención del valor del ancho de banda en primer lugar se procederá a determinar el valor de la potencia instantánea de parque de generación undimotriz (valor p.u) a partir del cual aparecen eventos fuera del estado normal de operación del sistema, así como los valores a partir de los cuales aparecen eventos en estado de alerta y de emergencia del sistema eléctrico. La aplicación del filtro dará como solución el valor de la potencia de parque de generación undimotriz ( $P_{GEN\ FILTRADA}$ ) que será la potencia generada máxima a entregar a la red para que se produzcan el mínimo posible de eventos fuera del estado normal de operación.

En la Figura 98 se representa a modo de ejemplo una recta solución del modelo de ajuste entre las desviaciones de frecuencia (Hz) y la potencia del parque de generación

undimotriz (valores p.u). En el eje X se representan los valores p.u para la potencia instantánea del parque de generación undimotriz y en el eje Y las desviaciones de frecuencia en Hz marcando los valores límite: 0 para los eventos fuera del estado normal de operación, 0,15 para los eventos en estado de alerta y 0,25 para los eventos en estado de emergencia del sistema establecidos por el TSO para los sistemas eléctricos insulares. Los puntos de corte entre la recta solución del modelo de ajuste y las rectas representativas de las desviaciones de frecuencia en sus diferentes rangos darán como resultados los valores de potencia del parque de generación undimotriz a partir de los cuales aparecen las desviaciones de frecuencia y en su caso eventos en estado de alerta y emergencia. En el gráfico ejemplo se han representado los puntos A y B, el punto A representa el valor de potencia de parque a partir del cual aparecen eventos fuera del estado normal de operación del sistema eléctrico y el punto B el valor de la potencia a partir del cual aparecen los eventos en estado de alerta.

A partir de los valores de potencia instantánea de parque obtenidos de los puntos A y B se determina el valor del ancho de banda de filtrado, siendo éste el que se encuentre entre el rango de valores de los puntos A y B. Los valores más favorables de ancho de banda de filtrado a aplicar serán aquellos cercanos al punto B ya que de esta forma no se producirán eventos fuera del estado normal de operación del sistema no permitidos por el TSO (eventos de alerta y emergencia).

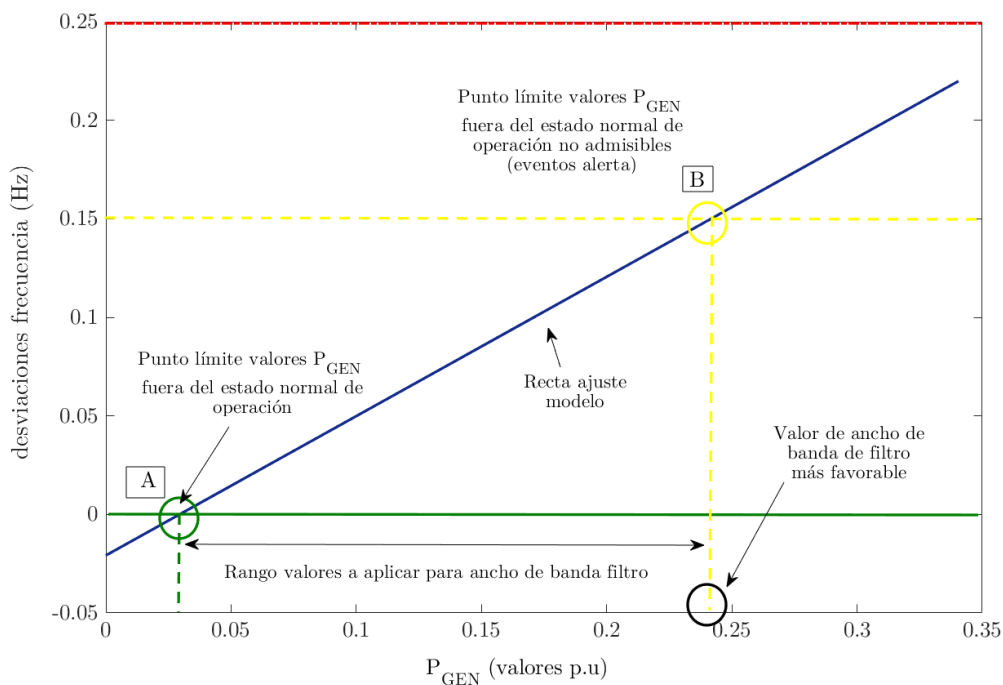


Figura 98. Gráfica ejemplo determinación valores de ancho de banda para el filtrado de  $P_{GEN}$ . Fuente: elaboración propia.

Posteriormente para conseguir entregar a la red el valor de la potencia alisada ( $P_{GEN\text{ FILTRADA}}$ ) mediante el filtrado de la potencia generada ( $P_{GEN}$ ) y optimizar la energía total obtenida por el parque de generación undimotriz a continuación se realiza la integración de un sistema de almacenamiento energético (ESS) al modelo.

### 8.2.1.1 Resultados del filtrado de potencia instantánea parque de generación undimotriz ( $P_{GEN}$ ).

Partiendo de los resultados obtenidos para el caso particular de estudio se procede a establecer el valor para el ancho de paso del filtro Butterworth para obtener  $P_{GEN\text{ FILTRADA}}$ .

En la Figura 99 se observa el diagrama de dispersión de la potencia instantánea generada por el parque de generación undimotriz (en valores p.u) frente a las desviaciones de frecuencia (Hz) y la recta de regresión de ajuste del modelo que ofrece una relación aproximada entre las desviaciones de frecuencia y la potencia instantánea del parque. Para proceder a determinar el valor del ancho de banda para el filtrado de la señal de la potencia instantánea se establecen los puntos de corte entre los valores límite de las desviaciones de frecuencia y la recta de ajuste del modelo (ver Figura 98).

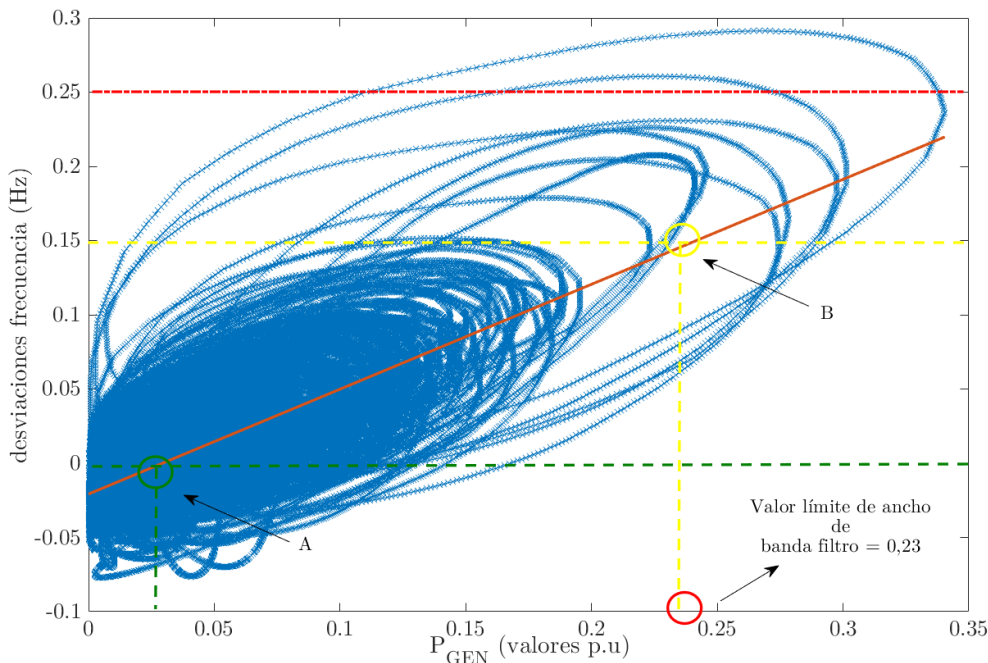


Figura 99. Gráfica determinación valores para el filtrado de la señal potencia parque de generación undimotriz.

El punto de corte de la recta del modelo con el valor de las desviaciones de frecuencia correspondiente a 0 representa el valor de la potencia a partir de la cual comienzan a existir desviaciones de frecuencia (valores superiores a 50Hz) (Punto A Figura 99). El

punto de corte de la recta del modelo con el valor de las desviaciones de frecuencia correspondiente a 0,15 representa el punto a partir del cual aparecen eventos no admisibles por el TSO (eventos en alerta) (Punto B Figura 99) y el punto 0,25 corresponde a los eventos no admisibles denominados de emergencia.

Por lo tanto, los valores a aplicar a nuestro ancho de banda de filtro serán los valores que se encuentran entre el valor 0,03 y el valor 0,23 (ver Figura 99).

En la Figura 100 se representan diferentes resultados de perfil de la potencia del parque de generación filtrado ( $P_{GEN FILTRADA}$ ) tras la aplicación de diferentes valores de ancho de banda de filtro.

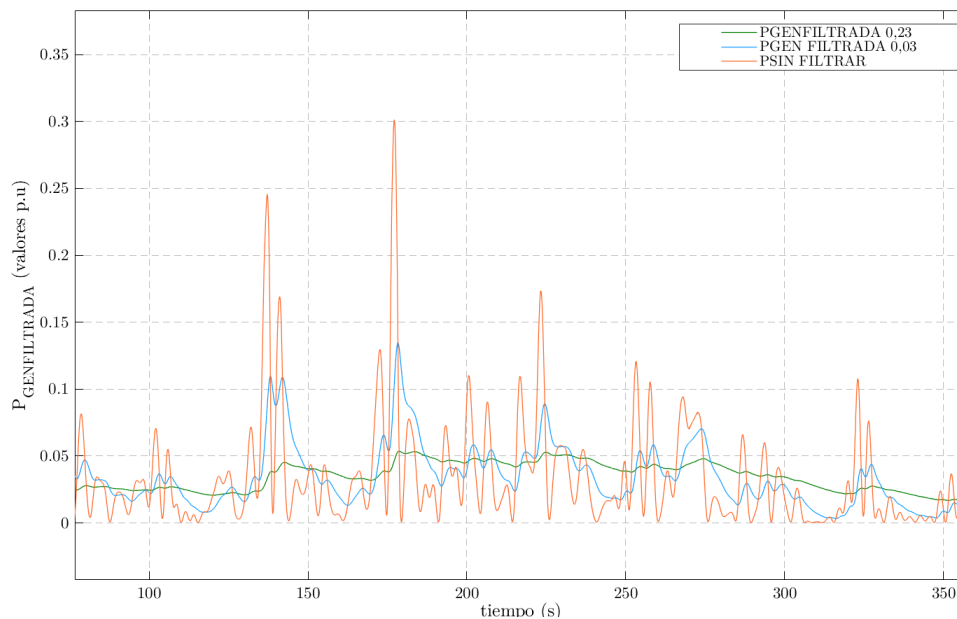


Figura 100. Valores potencia parque de generación para diferentes valores de filtrado.

En la Figura 101 se representa el resultado de la aplicación del filtrado de la señal de potencia generada por el parque de generación undimotriz para ambos puntos de la corte y la situación inicial para el perfil de comportamiento de la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife. Como se observa una vez aplicado el filtrado de la señal se minimizan las desviaciones de frecuencia siendo estos valores de potencia filtrada la base para la integración del ESS.

En la Figura 101 se observa que los valores estimados de manera gráfica en la Figura 99 coinciden con los límites establecidos para las desviaciones de frecuencia. En el caso de aplicar un filtrado de la potencia de 0,03 los valores para la frecuencia de la red eléctrica de la isla de Tenerife se acercan a los 50 Hz. En el caso de la aplicación de un filtrado de 0,23 se observa claramente la presencia de valores en el límite del estado de alerta sin llegar a él.



Por lo tanto, el objetivo será el de entregar a la red de Tenerife el valor obtenido de  $P_{\text{GEN}}^{\text{FILTRADA}}$  optimizando el aprovechamiento de la potencia total generada por el parque undimotriz. Para optimizar el aprovechamiento de la potencia generada por el parque undimotriz se integrará un sistema de almacenamiento energético (ESS).

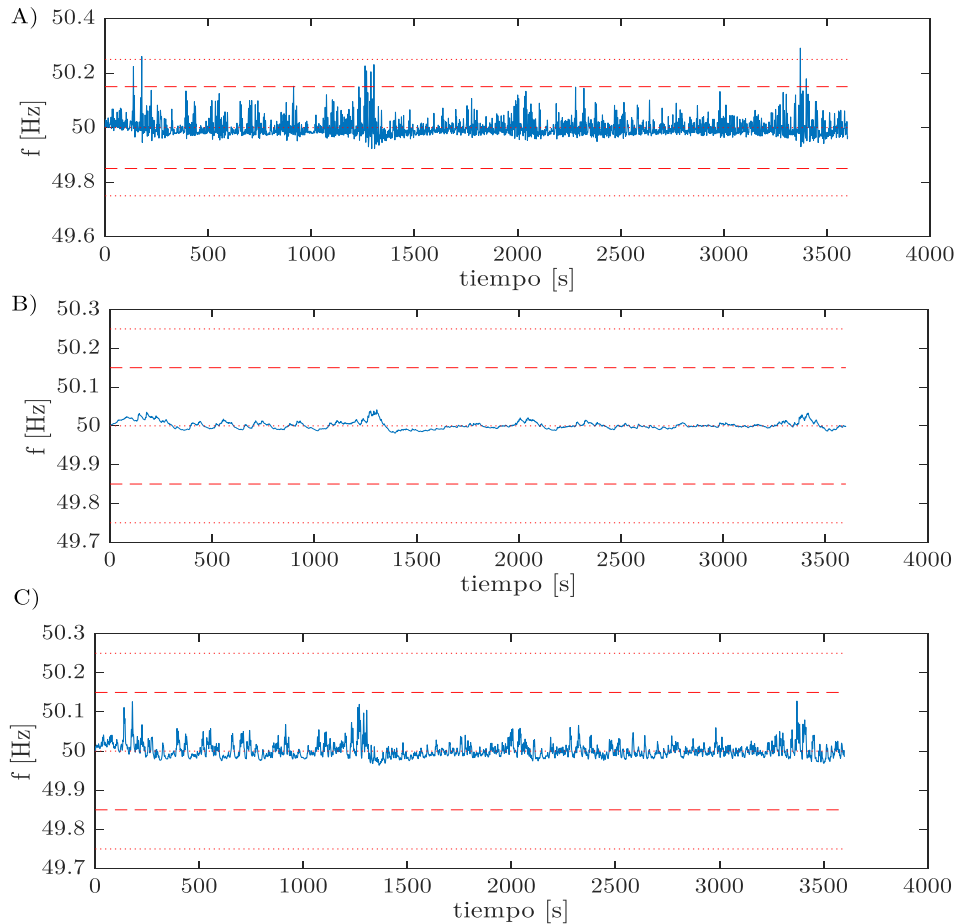


Figura 101. Perfil de comportamiento de la frecuencia de la red de la isla de Tenerife: A) sin filtrar B) con filtrado 0,03 y C) filtrado 0,23.

### 8.2.2 Cálculo Potencia Almacenamiento ( $P_{\text{ESS}}$ ).

Una vez determinada la  $P_{\text{GEN}}^{\text{FILTRADA}}$  y por lo tanto el valor de la  $P_{\text{ESS}}$  aplicando la Ecuación 28 se realizará el cálculo de la potencia y energía máximas con el objetivo de realizar el dimensionado del sistema de almacenamiento a integrar en el modelo.

En primer lugar, se realizará el procedimiento sin limitar el valor de la  $P_{\text{ESS}}$  como si se integrara un almacenamiento infinito en el sistema. Este paso previo nos ayudará a

evaluar las necesidades de almacenamiento existentes si se quisieran minimizar al máximo el nº de desviaciones de frecuencia.

En segundo lugar, se procederá a limitar la  $P_{ESS}$  mediante la integración de un bloque de saturación planteando un escenario más real de dimensionado para el sistema de almacenamiento obteniendo una  $P_{ESS\ LIMITADA}$ . Para la determinación de los límites de saturación se hará uso nuevamente de la gráfica Figura 96. Tomando los valores correspondientes a los puntos A y B de la Figura 99, los límites de saturación a aplicar a la  $P_{ESS\ LIMITADA}$  se establecerán a partir de la diferencia entre estos puntos límite de la potencia generada por el parque undimotriz (valor B potencia parque pu-valor A potencia parque pu) siendo el valor obtenido el rango a aplicar en el bloque de saturación.

Una vez determinados los límites de saturación para la obtención de la  $P_{ESS\ LIMITADA}$  se procede a evaluar en términos económicos la viabilidad de la elección de dichos límites. Para ello se plantean diferentes valores de límites de saturación y se realiza el dimensionamiento del ESS seleccionado, así como la evaluación de su coste evaluando finalmente en términos técnicos y económicos los diferentes casos con el objetivo de llegar a una solución de equilibrio para el ESS a integrar en nuestro modelo.

### 8.2.2.1 Resultados cálculo potencia almacenamiento ( $P_{ESS}$ ).

Determinado el valor de la potencia a filtrar ( $P_{GEN\ FILTRADA}$ ) se procede al cálculo de la potencia a almacenar ( $P_{ESS}$ ) (Figura 102).

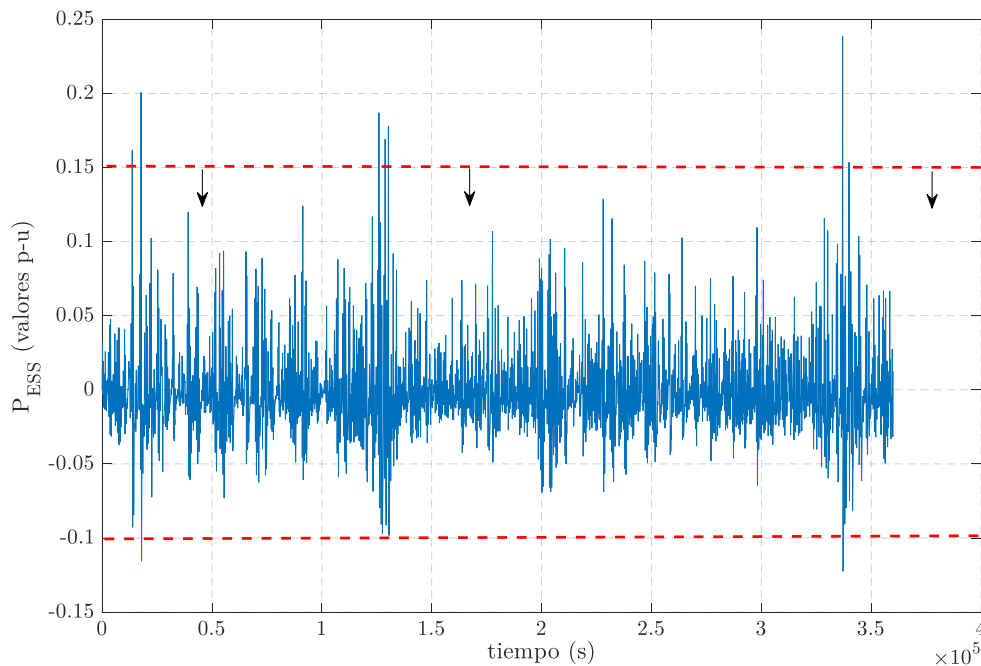


Figura 102. Perfil de  $P_{ESS}$ .

El valor de  $P_{ESS}$  calculada se asimila a un sistema de almacenamiento infinito, se almacena todo lo necesario de  $P_{GEN}$  hasta llegar al valor de  $P_{GEN\ FILTRADA}$ , dando como resultado un ESS técnica y económicamente inviable. Para dar solución y obtener un sistema ESS viable se procede a establecer una limitación de la  $P_{ESS}$ , esta limitación se realiza por medio de la integración de un bloque de saturación.

Se ha procedido a establecer los límites del bloque de saturación. Para ello se ha hecho uso de los límites establecidos en la Figura 99. La diferencia entre los límites establecerá el valor de la  $P_{ESS}$  a partir del cual aparecen las desviaciones de frecuencia y por lo tanto los eventos (alerta y emergencia) no permitidos por el *TSO*. En nuestro caso de aplicación ese valor es de aproximadamente 0,20 valores p.u. En la Figura 102 se ha procedido a graficar dichos límites. Si se almacena potencia por debajo de esos límites se producirán eventos fuera del estado normal de operación del sistema no permitidos por el *TSO*.

Se aplicarán diferentes valores para los límites de saturación (Tabla 19) para establecer una  $P_{ESS\ LIMITADA}$  que dé como solución un sistema de almacenamiento real intentando que a su vez se minimice la aparición de eventos fuera del estado normal de operación no admisibles por el *TSO* estableciendo una situación de equilibrio. Se toma como punto de partida el denominado Caso 0 (sin limitar).

<i>Caso</i>	<i>Límite de saturación inferior</i>	<i>Límite de saturación superior</i>	$P_{ESS}$ <i>MÁX</i> <i>(p.u)</i>	$E_{ESS}$ <i>MÁX</i> <i>(p.u)</i>	$N^\circ$ <i>eventos</i> <i>totales</i>	$N^\circ$ <i>eventos</i> <i>alerta</i>	$N^\circ$ <i>eventos</i> <i>emergencia</i>
0	-0,1	0,24	0,24	0,705	6199	0	0
1	-0,1	0,15	0,15	0,6312	6203	0	0
2	-0,1	0,1	0,1	0,4171	6525	150	0
3	-0,1	0,05	0,05	0,2995	9119	654	0

Tabla 19. Casos límites de saturación.

Una vez determinada la energía y potencia máximas a almacenar para cada caso se procede a realizar se procede a la selección del ESS más adecuado.

### 8.2.2.2 Selección del sistema de almacenamiento (ESS).

Teniendo en cuenta lo expuesto en el apartado dedicado al estado del arte de los estudios de alisado de potencia en el ámbito de la energía undimotriz conviene utilizar tecnologías de poca energía y elevada potencia. Ya se comentó que algunas soluciones de baterías, volantes de inercia y supercondensadores pueden resultar adecuadas para esta aplicación concreta. La selección de uno u otro sistema dependerá del análisis concreto de cada una de las tecnologías candidatas encontradas comercialmente y que cumplan con los requisitos de potencia y energía. Tras la evaluación de distintas alternativas se tendrá en cuenta la que suponga una mejor opción técnico-económica. En el desarrollo de esta tesis

se va a hacer este ejercicio con una de las tecnologías de almacenamiento, teniendo en cuenta que para el resto se procedería de la misma manera. Se selecciona como tecnología para analizar un sistema de almacenamiento formado por supercondensadores.

Se han seleccionado un módulo formado por celdas de supercondensadores de la marca Maxwell Technologies [129] para conformar el ESS. La  $P_{MÁX}$  de cada módulo es de 138kW y la  $E_{MÁX}$  0,727 kWh, estando integrado cada módulo por 256 celdas de supercondensadores.



Figura 103. Módulo formado por 256 supercondensadores Maxwell Technologies perteneciente al laboratorio de ensayos CIEMAT. Fuente: elaboración propia.

Tomando los valores de  $P_{ESSMÁX}$  y  $E_{ESSMÁX}$  se ha procedido a dimensionar el ESS para los diferentes casos establecidos en la Tabla 19 . Una vez obtenidos el nº de módulos que cumplen las necesidades de potencia también se ha realizado la comprobación de que dicho dimensionamiento cumple con necesidades en términos de energía requeridas para cada caso, cumpliendo en todos los casos de estudio.

Tras dimensionar los ESS se ha procedido al cálculo del coste total de la instalación que cumpla con los requisitos necesarios. Para realizar el cálculo del coste (€/kW) se ha tomado como valores de referencia los recogidos en el documento “*Energy Storage Technology and Cost Characterization Report*” [130] en donde se resumen los costes por tecnologías de almacenamiento energético en base a valores recopilados en 2018 y con proyección a 2025 teniendo en cuenta los avances en las TRL de las tecnologías de almacenamiento energético [130]. Hay que tener en cuenta que el coste en sistemas de almacenamiento destinados a potencia, como es el caso de los supercondensadores, se suele dar en términos de €/kW, que es más conveniente que hacerlo en términos de €/kWh.

Para el caso nuestro ESS formado por supercondensadores se ha tomado como valor para el cálculo del coste de la instalación 930 (€/kW) (ver Anexo Capítulo 7) perteneciente al

documento referenciado [130]. Este coste incluye el coste de los supercondensadores, su sistema de control, el coste del balance de planta, construcción y desmantelamiento de la instalación.

<i>Caso</i>	<i>N° de módulos</i>	<i>Coste (€)</i>
0	192	24.641.280
1	130	16.684.200
2	87	11.165.580
3	44	5.646.960

Tabla 20. Dimensionamiento y costes del ESS para los diferentes casos de estudio.

En la Figura 105 se han representado las curvas características de los costes de la instalación frente a los eventos fuera del estado normal de operación y los eventos de alerta. Como se observa en la Figura 105 existe una zona donde el coste de la instalación decrece de manera considerable justo en el mismo punto donde comienzan a crecer el n° de eventos en alerta. Esa zona de equilibrio marcará dos puntos límites en base a dos criterios diferenciados a la hora de establecer la  $P_{ESS\ LIMITADA}$  adecuada, según se quiera primar la no aparición de eventos de alerta en el sistema (Punto A) o el coste de la instalación (Punto B).

Para el caso de aplicación de la presente tesis doctoral se ha decidido optar por establecer los límites de saturación de la  $P_{ESS\ LIMITADA}$  hacia un valor cercano al punto B, correspondiente al caso el n° 2 de la Tabla 19.

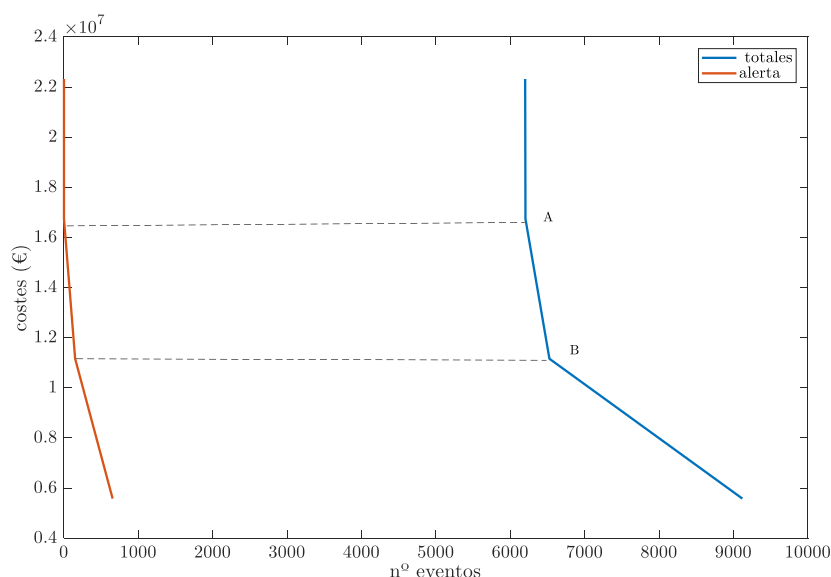


Figura 104. Características de costes del ESS frente a eventos.

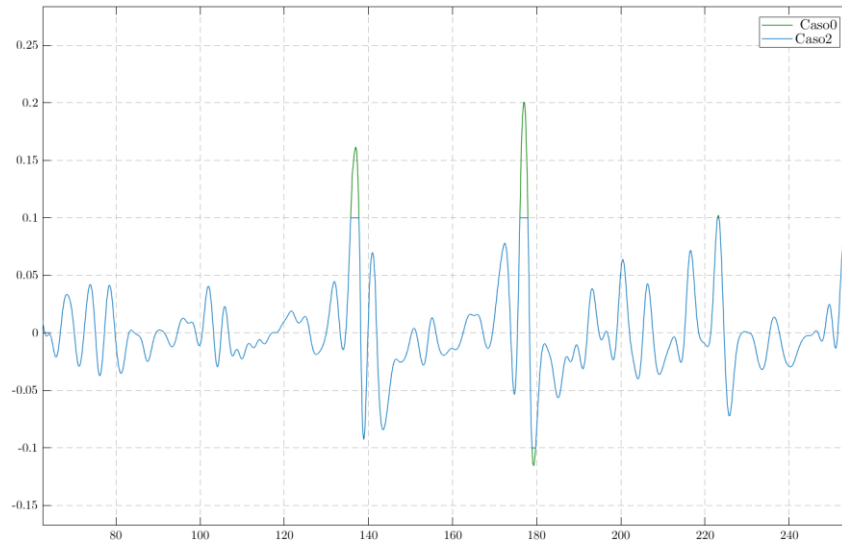


Figura 105.  $P_{ESS}$  sin limitar (Caso 0) frente a  $P_{ESS LIMITADA}$  seleccionada (Caso 2).

### 8.2.3 Integración potencia alisada en red ( $P_{GEN\_SMOOTHING}$ ).

Determinada la  $P_{ESS LIMITADA}$  se procederá al cálculo de la potencia a entregar a la red eléctrica débil, alisada mediante el uso del sistema de almacenamiento ( $P_{GEN\_SMOOTHING}$ ) para cada escenario planteado de almacenamiento (Ecuación 29). Cada valor de  $P_{GEN\_SMOOTHING}$  será integrado en el modelo de red eléctrica débil para la evaluación del perfil de comportamiento de la frecuencia de red una vez aplicado el mecanismo de suavizamiento de la señal.

$$P_{GEN\_SMOOTHING} = P_{GEN} - P_{ESS LIMITADA}$$

Ecuación 29. Cálculo de potencia de alisado ( $P_{GEN\_SMOOTHING}$ ) a partir de la potencia de almacenamiento limitada.

#### 8.2.3.1 Resultados integración potencia alisada en red ( $P_{GEN\_SMOOTHING}$ ).

Determinada la  $P_{ESS LIMITADA}$  se ha procedido al cálculo de la potencia generada por el parque undimotriz alisada ( $P_{GEN\_SMOOTHING}$ ) a integrar en la red eléctrica de la isla de Tenerife. En la Figura 106 se representa el perfil de potencia generada por el parque de generación undimotriz sin alisar y alisada.

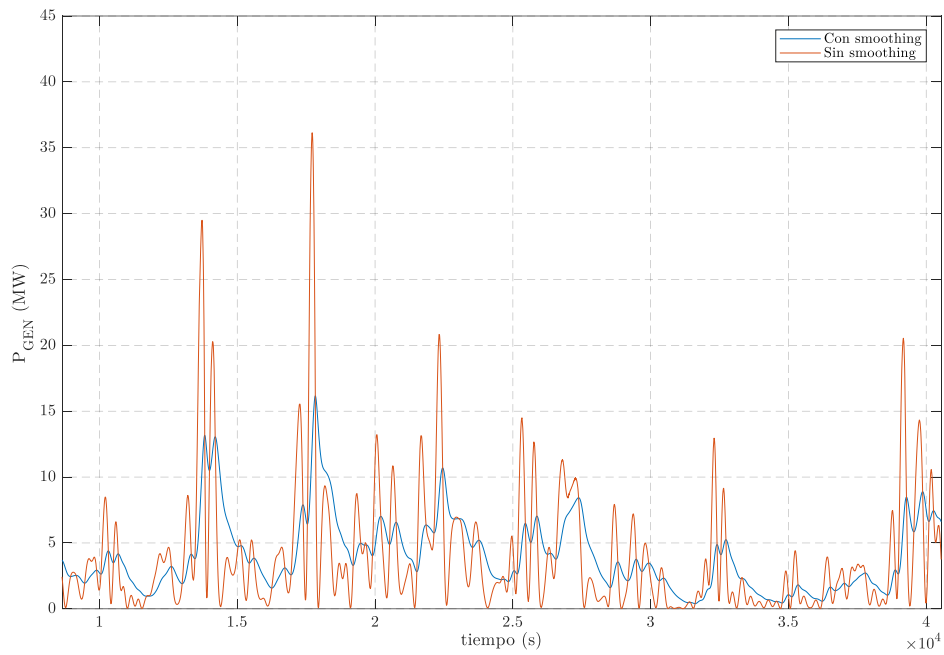


Figura 106.  $P_{GEN}$  smoothing y  $P_{GEN}$  sin smoothing.

En la Figura 107 se representa el perfil de potencia generada por el parque de generación undimotriz sin alisar y alisada.

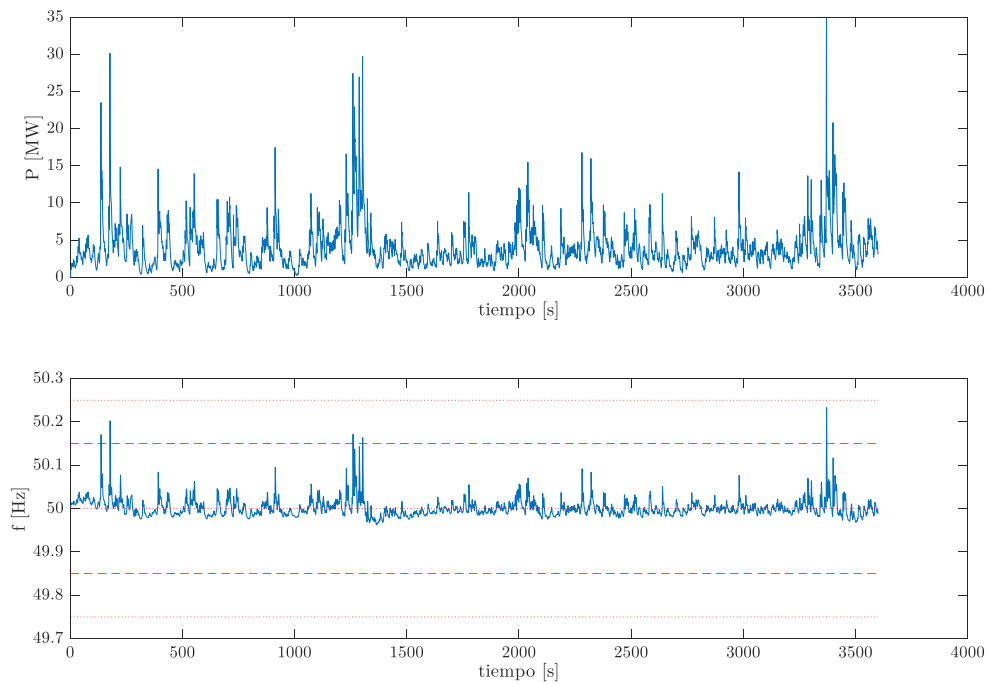


Figura 107.  $P_{GEN}$  SMOOTHING mediante integración ESS real y perfil de comportamiento de frecuencia de red de la isla de Tenerife.

Si se integra el perfil de  $P_{\text{GEN SMOOTHING}}$  en la red eléctrica de la isla de Tenerife se obtiene el perfil de comportamiento de la frecuencia de la Figura 107 en el cual se han disminuido de manera considerable los eventos fuera del estado normal de operación del sistema. Como se expuso el apartado dedicado al cálculo de la  $P_{\text{ESS}}$  se ha optado por la opción de que aparecen ciertos eventos en estado de alerta del sistema para favorecer la integración del ESS realizando también de esta forma un mejor aprovechamiento de la potencia generada por el parque de generación undimotriz pudiendo verter a la red la energía almacenada de éste cuando los requisitos de la red lo requieran.



## 9 Conclusiones y futuras líneas de investigación.

### 9.1 Conclusiones.

Una vez realizado el trabajo de investigación se exponen las principales conclusiones obtenidas.

Del análisis de estabilidad de la frecuencia de una red eléctrica débil ante la integración de un parque de generación undimotriz se concluye que la aparición de desviaciones de la frecuencia está ligado a la característica oscilante de la potencia generada por el parque undimotriz y a las características propias de la red eléctrica débil.

La característica de la señal de potencia del parque undimotriz se encuentra ligada al recurso del oleaje y la distribución espacial del parque en el mar. Se puede actuar sobre estos dos factores. En el caso del recurso del oleaje realizando un estudio previo donde se analice el comportamiento del oleaje en las diferentes zonas, eligiendo aquellos perfiles que sean más convenientes. Sin embargo, la selección de zonas con menor recurso y por tanto menor potencia generada pone en riesgo que no se alcancen los criterios económicos para su viabilidad desde el punto de vista del aprovechamiento óptimo de la generación. En el caso de la distribución espacial del parque en el mar la elección de la selección de las variables adecuadas daría como resultado el alisado de la potencia del parque undimotriz sin comprometer la energía obtenida del mismo siendo esta estrategia viable desde el punto de vista técnico.

En el caso de las características propias de la red eléctrica débil se ha concluido que la inercia del sistema es la variable que influye en la aparición de desviaciones de la frecuencia. Este aspecto queda fuera del control del gestor del parque de generación no pudiendo actuar al respecto. Es por tanto uno de los condicionantes que hay que tener en cuenta a la hora de definir tanto la potencia instalada en la generación undimotriz como en la selección de los mecanismos para reducir los efectos de desviación de frecuencia.

De la aplicación del mecanismo de alisado de potencia por medio del sistema de almacenamiento energético se concluye que los casos desfavorables en escenarios de parques undimotrices en los que aparecen eventos fuera del estado normal de operación del sistema no son un problema, ya que mediante la utilización de sistemas de almacenamiento de energía como los que se proponen en este trabajo se reducen considerablemente los eventos de desviación de frecuencia, en especial los de alerta y emergencia, transformando estos escenarios no viables en viables.

Teniendo en cuenta estos aspectos se concluye del presente estudio que la integración de energía undimotriz en redes eléctricas débiles en términos de estabilidad de la frecuencia

de red, aunque puede presentar problemas cuando el nivel de potencia inyectada en la red supera un cierto valor, no presenta una problemática asociada puesto que existen medios tecno-económicamente viables para resolver este problema. Por tanto, resulta viable la integración de este tipo de energía renovable en estos sistemas eléctricos débiles, haciendo uso de la normativa establecida por el operador del sistema y teniendo en cuenta las estrategias expuestas en el presente documento.

A nivel metodológico se concluye que de la aplicación del procedimiento generado tanto para el análisis de la frecuencia como para el mecanismo de alisado de potencia se obtienen resultados que contribuyen a la mejora de la estabilidad de frecuencia ante la integración de energía undimotriz, siendo por tanto herramientas de gran utilidad tanto en el ámbito de la investigación teórica como en el desarrollo industrial para el avance de la integración de parques de generación de energía undimotriz.

## 9.2 Futuras líneas de investigación.

A continuación, se señalan las futuras líneas de investigación a desarrollar a partir del presente trabajo:

- Estudio de la estabilidad de la tensión para redes eléctricas débiles ante la integración de energía undimotriz. En vista de los resultados obtenidos en el estudio de estabilidad de la frecuencia se plantea de interés el estudio de la estabilidad de otro de los parámetros vinculados a la estabilidad de red como es la tensión.
- Mecanismos de alisado de la potencia vinculados a la distribución espacial en el mar del parque de generación undimotriz para contribuir a la estabilidad de la frecuencia. La distribución espacial del parque en el mar como se ha comprobado en el presente estudio es un factor a tener en cuenta para contribuir a la estabilidad de la frecuencia de red. Se plantea como nueva línea de investigación la optimización mediante algoritmos evolutivos con el objetivo de conseguir una distribución espacial de parque de generación que minimice la aparición de desviaciones de frecuencia. Durante la realización del presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo un pequeño estudio al respecto siendo de interés obteniendo resultados positivos.
- Estudio de estabilidad de la frecuencia ante la integración de parques de generación undimotriz que presenten características diferenciadoras como la interacción entre los WECs o parques de generación formados por diferentes tipos o geometrías de WEC. Estos factores afectan a la potencia generada por el parque de generación undimotriz y por lo tanto pueden darse escenarios de desviaciones de frecuencia a tener en cuenta y analizar.

## 10 Bibliografía

- [1] D. Ross, *Power from the Waves*, Oxford University Press, 1996.
- [2] J. Falnes, *Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including waves-energy extraction*, Cambridge University Press, 2002.
- [3] A. Clément, P. McCullen, A. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M.-T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjöström, H. C. Sørensen y T. Thorpe , «Wave energy in Europe: current status and perspectives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, n° 5, pp. 405-431, 2002.
- [4] J. Chozas, «Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad,» Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [5] P. F. Díez, «Energía de las olas».
- [6] M. Meylan, «Wikiwaves,» New Zealand Institute of Mathematics, 2012. [En línea]. Available: [https://wikiwaves.org/Ocean-Wave\\_Spectra](https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra).
- [7] A. F. d. O. Falcao, «Wave energy utilization: A review of the technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 3, pp. 899 - 918, 2010.
- [8] A. F. de O. Falcão, «First-Generation Wave Power Plants: Current Status and R&D Requirement,» *Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering*, vol. 126, n° 4, pp. 384-388, 2004.
- [9] L. O. C. Szabo, «Wave Energy Plants for the Black Sea-Possible Energy Converter Structures (ICCEP),» de *International Conference on Clean Electrical Power Clean Electrical Power*, Capri, Italy, 2007.
- [10] M. Mueller, «Electrical generators for direct drive wave energy converters,» de *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2002.
- [11] «Proyecto Mutriko.,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/procedimientos-de-operacion>.
- [12] «OWC Pico Power Plant,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.pico-owc.net/>.
- [13] «Waveroller. Aquamarine,» [En línea]. Available: <https://aw-energy.com/waveroller/>.
- [14] «First stage deployment of Oyster wave converter complete,» *Renewable Energy Focus*, vol. 10, n° 5, 2009.

- [15] «Langlee Wave Power,» [En línea]. Available: <http://langleewp.com/>.
- [16] «OPT-TOTAL Santoña. Iberdrola,» [En línea]. Available: <http://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/cswaveiberdrola.pdf>.
- [17] «Corpower Ocean,» [En línea]. Available: <http://www.corpowerocean.com/>.
- [18] «Proyecto Undigen,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.retema.es/noticia/el-proyecto-undigen-prueba-la-generacin-de-energa-elctrica-de-las-olas-en-gran-canaria-con-tecnologa-100-espaola>.
- [19] «AQUARET Delivering knowledge and understanding,» [En línea]. Available: <http://www.aquaret.com/>.
- [20] E. Commision, «JRC Ocean Energy Status Report,» JRC Science Hub, The Netherlands, 2016.
- [21] M. d. T. E. G. d. España., «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima PNIEC (2021-2030)».
- [22] T. E. M. C. (EMEC), «Technology Readiness Levels (TRL),» 2020. [En línea]. Available: <http://www.emec.org.uk/services/pathway-to-emec/technology-readiness-levels/>.
- [23] G. A. P. Cabrera, «Guía para modelado de estabilidad en sistemas de potencia,» Universidad de la Salle. , Bogotá D.C., 2017.
- [24] L. M. Loustaunau, «Estabilidad de los sistemas de potencia,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2002.
- [25] P. Kundur, N. J. Balu y M. G. Lauby, Power system stability and control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [26] N. Y. G. Molina, «Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energía renovables, mediante un controlador PI o imitación inercial,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia, 2017.
- [27] A. Etxegarai, P. Eguia, E. Torres, A. Iturregi y V. Valverde, «Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1501-1514, 2015.
- [28] C. Bernardi y D. Gotti , «Integración de energías renovables en sistemas eléctricos,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2018.
- [29] «European Network of Transmission System Operators (ENTSOE),» [En línea]. Available: <https://www.entsoe.eu/>.
- [30] «Red Eléctrica España,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/>.
- [31] C. Europea, «Libro Verde. Un marco para las políticas de clima y energía en 2030,» 2013.

- 
- [32] E. N. o. T. S. O. f. E. (ENTSO-E), «Frequency ranges, ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection,» 2018.
- [33] E. N. o. T. S. O. (ENTSO-E), «Continental Europe Operation Handbook,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/#continental-europe-operation-handbook>.
- [34] «Procedimientos operación REE para sistemas eléctricos no peninsulares,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/procedimientos-de-operacion>.
- [35] E. J. Medina Domínguez, «Análisis de algunos aspectos técnicos relacionados con la integración de energías renovables en sistemas eléctricos pequeños y aislados,» Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. ACCEDA, 2016.
- [36] P. Ledesma, «Curso abierto Operación y Control de Sistemas Eléctricos,» Universidad Carlos III , Madrid, 2008.
- [37] J. Merino, P. Mendoza-Araya y C. Venganzones , «State of the Art and Future Trends in Grid Codes Applicable to Isolated Electrical Systems,» *Energies*, vol. 7, pp. 7936-7954, 2014.
- [38] R. E. E. (REE), «P.O. 12.2 Instalaciones conectadas a la red de transporte y equipo generador: requisitos mínimos de diseño, equipamiento, funcionamiento, puesta en servicio y seguridad" de los sistemas eléctricos no peninsulares.,» 2018. [En línea]. Available: [https://www.ree.es/sites/default/files/01\\_ACTIVIDADES/Documentos/Procedimientos Operacion/PO\\_resol\\_01feb2018.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/Procedimientos Operacion/PO_resol_01feb2018.pdf).
- [39] E. Rodrigues, G. Osório, R. Godina, A. Bizuayehu, J. Lujano-Rojas y J. Catalão, «Grid code reinforcements for deeper renewable generation in insular energy systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 163-177, 2016.
- [40] I. R. E. A. (IRENA), «Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030,» IRENA, Abu Dhabi., 2017.
- [41] K. Gunn y C. Stock-Williams, «Quantifying the global wave power resource,» *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 296-304, 2012.
- [42] H. Bernhoff, E. Sjöstedt y M. Leijon, «Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the Baltic Sea,» *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2164-2170, 2006.
- [43] W. Komporn, C. Ekkawatpanit y D. Kositgittiwong, «Assessment of ocean wave energy resource potential in Thailand,» *Ocean and Coastal Management*, pp. 64 - 74, 2018.
- [44] J.-S. López-Gutiérrez, M. D. Esteban y V. Negro, «Wave energy potential assessment and feasibility analysis of wave energy converters. Case Study: Spanish Coast,» *Journal of Coastal Research*, vol. 85, pp. 1291 - 1295, 2018.

- [45] E. Ltd, Ed.«The wave and tidal resource of Scotland,» *Renewable Energy*,, vol. 114, pp. 3 - 17, 2017.
- [46] M. G. Hughes y A. D. Heap, «National-Scale wave energy resource assessment for Australia,» *Renewable Energy*, vol. 35, nº 8, pp. 1783 - 1791, 2010.
- [47] «National Data Buoy Center USA,» [En línea]. Available: <http://www.ndbc.noaa.gov/>.
- [48] «Puertos del Estado. España,» [En línea]. Available: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>.
- [49] D. U. o. Technology, « TuDelft, SWAN,» [En línea]. Available: <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/>.
- [50] Deltares, «Delft3D Flexible Mesh Suite,» [En línea]. Available: <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/>.
- [51] C. Guedes Soares, A. R. Bento, M. Gonçalves, D. Silva y P. Martinho, «Numerical evaluation of the wave energy resource along the Atlantic European coast,» *Computers and Geosciences*, vol. 71, pp. 37-49, 2014.
- [52] K. Ram, S. Narayan, M. R. Ahmed, P. Nakavulevu y Y.-H. Lee, «In situ near-shore wave resource assessment in the Fiji Islands,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 23, pp. 170-178, 2014.
- [53] J. E. Stopa, K. F. Cheung y Y.-L. Chen, «Assessment of wave energy resources in Hawaii,» *Renewable Energy*, vol. 36, nº 2, pp. 554 - 567, 2011.
- [54] M. Bernardino, L. Rusu y C. Guedes Soares, «Evaluation of the wave energy resources in the Cape Verde Islands,» *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 316 - 326, 2017.
- [55] E. Rusu y C. Guedes Soares, «Wave Energy pattern around the Madeira Islands,» *Energy*, vol. 45, nº 1, pp. 771-785, 2012.
- [56] H. Chiri, M. Pacheco Martínez y G. Rodríguez Rodríguez, «Spatial variability of wave energy resources around the Canary Islands,» de *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2013.
- [57] M. Gonçalves, P. Martinho y C. Guedes Soares, «Assessment of wave energy in the Canary Islands,» *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 774 - 784, 2014.
- [58] L. Rusu y C. Guedes Soares, «Wave energy assessments in the Azores islands,» *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 183-196, 2012.
- [59] M. Veigas y G. Iglesias, «Wave and offshore wind potential for the island of Tenerife,» *Energy Conversion and Management*, vol. 76, nº 8, pp. 738-745, 2013.

- 
- [60] E. Al Shami, R. Zhang y X. Wang, «Point absorber wave energy harvesters: A review of recent developments,» *Energies*, vol. 12, n° 1, 2019.
- [61] L. Wang, A. Kolios, L. Cui y Q. Sheng, «Flexible multibody dynamics modelling of point-absorber wave energy converters,» *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 790-801, 2018.
- [62] A. Kolios, L. F. Di Maio, L. Wang, L. Cui y Q. Sheng, «Reliability assessment of point-absorber wave energy converters,» *Ocean Engineering*, vol. 163, pp. 40-50, 2018.
- [63] Y. Li y Y.-H. Yu, «A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 6, pp. 4352 - 4364, 2012.
- [64] «Technology Readiness levels (TRL) EMEC,» [En línea]. Available: <http://www.emec.org.uk/services/pathway-to-emec/technology-readiness-levels/>.
- [65] M. Shadman, S. F. Estefen, C. A. Rodriguez y I. C. Nogueira, «A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter,» *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 533-546, 2018.
- [66] L. Sjökvist, R. Krishna, M. Rahm, V. Castellucci, H. Anders y M. Leijon, «On the Optimization of Point Absorber Buoys,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 2, n° 2, pp. 477-492, 2014.
- [67] M. Blanco, P. Moreno-Torres, M. Lafoz y D. Ramírez, «Design Parameters Analysis of Point Absorber WEC via an evolutionary-algorithm-based Dimensioning Tool,» *Energies*, vol. 8, n° 10, pp. 11203-11233, 2015.
- [68] M. Blanco, M. Lafoz, D. Ramirez, G. Navarro, J. Torres y L. Garcia-Tabares, «Dimensioning of Point Absorbers for Wave Energy Conversion by Means of Differential Evolutionary Algorithms,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, n° 3, pp. 1076 - 1085, 2019.
- [69] U. d. Nantes, « Laboratoire de reserche en Hydrodinamique , Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA),» [En línea]. Available: <https://lheea.ec-nantes.fr/>.
- [70] A. Ruezga y J. M. Canedo C, «Buoy Analysis in a Point-Absorber Wave Energy Converter,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 1 - 8, 2019.
- [71] R. Alamian, R. Shafaghat y M. Safaei, «Multi-Objective Optimization of a Pitch Point Absorber Wave Energy Converter,» *WATER*, vol. 11, n° 5, 2019.
- [72] I. Fairley, H. Smith, B. Robertson, M. Abusara y I. Masters, «Spatio-temporal variation in wave power and implications for electricity supply,» *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 154-165, 2017.

- [73] S. Bozzi, M. Giassi, A. Moreno Miquel, A. Antonini, F. Bizzozero, G. Grusso, R. Archetti y G. Passoni, «Wave energy farm design in real wave climates: the Italian offshore,» *Energy*, vol. 122, pp. 378 - 389, 2017.
- [74] A. Babarit, B. Borgarino, P. Ferrant y A. Clément, «Assessment of the influence of the distance between two wave energy converters on energy production,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, n° 6, pp. 592 - 601, 2010.
- [75] A. Babarit, «Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters,» *Ocean Engineering*, vol. 37, n° 8, pp. 718 - 729, 2010.
- [76] A. Babarit, «On the park effect in arrays of oscillating wave energy converters,» *Renewable Energy*, vol. 58, pp. 68-78, 2013.
- [77] Babarit.A, «A review of the park effect in arrays of wave energy converters,» de *ICOE2012*, Dublin, Ireland, 2012.
- [78] B. Child y V. Venugopal, «Optimal configurations of wave energy device arrays,» *Ocean Engineering*, vol. 37, n° 16, pp. 1402 - 1417, 2010.
- [79] M. Giassi y M. Göteman, «Layout design of wave energy parks by a genetic algorithm,» *Ocean Engineering*, vol. 154, pp. 252 - 261, 2018.
- [80] C. Sharp y B. DuPont, «Wave energy converter array optimization: A genetic algorithm approach and minimum separation distance study,» *Ocean Engineering*, vol. 163, pp. 148 - 156, 2018.
- [81] A. Parwal, M. Fregelius, I. Temiz, M. Göteman, J. G. d. Oliveira, C. Boström y M. Leijon, «Energy management for a grid-connected wave energy park through a hybrid energy storage system,» *Applied Energy*, vol. 231, pp. 399 - 411, 2018.
- [82] H. Bailey, B. Robertson y B. Buckham, «Variability and stochastic simulation of power from wave energy converter arrays,» *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 721 - 733, 2018.
- [83] I. Moazzen, B. Robertson, P. Wild, A. Rowe y B. Buckham, «Impacts of large-scale wave integration into transmission constrained grid,» *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 408-417, 2016.
- [84] P. Pradhan, K. Hatalis, S. Kishore, R. S. Blum y A. J. Lamadrid, «Prospects of wave power grid integration,» de *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2014.
- [85] H. Polinder y M. Scuotto, «Wave energy converters and their impact on power systems,» de *International Conference on Future Power Systems*, 2005.
- [86] S. Armstrong, E. Cotilla-Sanchez y T. Kovaltchouk, «Assessing the Impact of the Grid-Connected Pacific Marine Energy Center Wave Farm,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, n° 4, pp. 1011-1020, 2015.



- 
- [87] A. Blavette, D. L. O'Sullivan, R. Alcorn, M. G. Egan y T. W. Lewis, «Simplified Estimation of the Flicker Level Induced by Wave Energy Farms,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, n° 3, pp. 1216-1223, 2016.
- [88] A. L. M. E. D. O. ' . Anne Blavette, «Grid Integration of Wave and Tidal Energy,» de *OMAE*, Rotterdam, Netherlands, 2011.
- [89] F. Sharkey, J. MacEnri, E. Bannon, M. Conlon y K. Gaughan, «Resource-induced voltage flicker for wave energy converters-assessment tools,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, n° 6, pp. 623-630, 2013.
- [90] T. Kovaltchouk, S. Armstrong, A. Blavette, H. Ben Ahmed y B. Multon, «Wave farm flicker severity: Comparative analysis and solutions,» *Renewable Energy*, vol. 91, n° 8, pp. 32-39, 2016.
- [91] A. Blavette, D. L. O'Sullivan, R. Alcorn, T. W. Lewis y M. G. Egan, «Impact of a Medium-Size Wave Farm on Grids of Different Strength Levels,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, n° 2, pp. 917-923, 2014.
- [92] A. Blavette, D. L. O'Sullivan, A. W. Lewis y M. G. Egan, «Impact of a wave farm on its local grid: Voltage limits, flicker level and power fluctuations,» de *Oceans*, Yeosu, 2012.
- [93] A. Medina, H. Mendonça y S. Martinez, «Study of Voltage Fluctuations Caused in a Distribution Grid by the Connection of a Wave Energy Converter and Corrective Actions Based on Reactive Power,» *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 832-838, 2016.
- [94] L. Trilla, T. Thiringer, S. Sahlin y T. Andersson, «Wave energy park power quality impact and collection grid economic assessment,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, n° 4, pp. 368-378, 2015.
- [95] R. Dario Jaramillo y A. Garces, «Wave energy: Modeling and Analysis of Power Grid Integration,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, n° 12, pp. 3863-3872, 2015.
- [96] A. Blavette, «Grid integration of wave energy & generic modelling of ocean devices for power system studies,» ProQuest Dissertations Publishing, 2013.
- [97] T. Kovaltchouk, A. Blavette, J. Aubry, H. Ben Ahmed y B. Multon, «Comparison Between Centralized and Decentralized Storage Energy Management for Direct Wave Energy Converter Farm,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, n° 3, pp. 1051 - 1058, 2016.
- [98] E. Tedeschi y M. Santos-Mugica, «Modeling and Control of a Wave Energy Farm Including Energy Storage for Power Quality Enhancement: the Bimep Case Study,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, n° 3, pp. 1489 - 1497, 2014.
- [99] G. Rajapakse, S. Jayasinghe, A. Fleming y M. Negnevitsky, «Grid Integration and Power Smoothing of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter,» *ENERGIES*, vol. 11, n° 7, 2018.

- [100] G. Brando, A. Dannier, A. Del Pizzo, L. P. Di Noia y C. Pisani, «Grid connection of wave energy converter in heaving mode operation by supercapacitor storage technology,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, n° 1, pp. 88-97, 2016.
- [101] S. Hazra y S. Bhattacharya, «Short Time Power Smoothing of a Low Power Wave Energy System,» de *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012.
- [102] D. B. Murray, J. G. Hayes, D. L. O'Sullivan y M. G. Egan, «Supercapacitor Testing for Power Smoothing in a Variable Speed Offshore Wave Energy Converter,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 37, n° 2, pp. 301-308, 2012.
- [103] B. Rojas-Delgado, M. Alonso, H. Amaris y J. de Santiago, «Wave Power Output Smoothing through the Use of a High-Speed Kinetic Buffer,» *ENERGIES*, vol. 12, n° 11, 2019.
- [104] A. Parwal, M. Fregelius, I. Temiz, M. Göteman, J. G. d. Oliveira, C. Boström y M. Leijon, «Energy Management for grid-connected wave energy park through a hybrid energy storage system,» *Applied Energy*, vol. 231, pp. 399 - 411, 2018.
- [105] J. N. Forestieri y M. Farasat, «Integrative Sizing/Real-Time Energy Management of a Hybrid Supercapacitor/Undersea Energy Storage System for Grid Integration of Wave Energy Conversion Systems.,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019.
- [106] J. Tissandier, A. Babarit y A. Clément, «Study of the smoothing effect on the power production in an array of SEAREV wave energy converters,» de *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (OMAE)*, 2008.
- [107] .. A. A. Tissandier J., «Smoothing of the instantaneous power production by grouping effect in an array of SEAREV wave energy converters.,» de *2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE)*, Brest, France, 2008.
- [108] Y.-H. Yu, N. Tom y D. Jenne, «Numerical analysis on hydraulic power take-off for wave energy converter and power smoothing methods,» de *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, 2018.
- [109] M. Molinas, O. Skjervheim, B. Sørby, P. Andreasen, S. Lundberg y T. Undeland, «Power Smoothing by Aggregation of Wave Energy Converters for Minimizing Electrical Energy Storage Requirements,» de *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.
- [110] M. Lafoz, M. Blanco y D. Ramirez, «Grid Connection for Wave Power Farms,» de *Proceedings 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011.
- [111] M. L. a. G. N. M. Blanco, «Wave energy converter dimensioning constrained by location, power take-off and control strategy.,» de *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, 2012.

- 
- [112] M. B. G. N. P. M.-T. C. V. a. A. L. M. Lafoz, «Laboratory tests before sea trials of a wave energy converter,» de *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Sevilla, 2015.
- [113] É. E. E. A. Universidad de Nantes. LABORATOIRE DE RECHERCHE EN HYDRODYNAMIQUE, «Nemoh,» [En línea]. Available: <https://lhea.ec-nantes.fr/logiciels-et-brevets/nemoh-presentation-192863.kjsp>.
- [114] N. R. E. L. (. a. S. N. L. (Sandia), «WEC-Sim (Wave Energy Converter SIMulator),» [En línea]. Available: <https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/>.
- [115] U. D. o. Energy, « National Renewable Energy Laboratory (NREL),» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/water/>.
- [116] U. D. o. E. N. N. S. Administration, «Sandia National Laboratories,» [En línea]. Available: <https://energy.sandia.gov/energy/renewable-energy/water-power/>.
- [117] «National Data Buoy Center,» [En línea]. Available: <http://www.ndbc.noaa.gov/> .
- [118] M. N.-S. Muños, «Modelado de un Convertidor Undimotriz del Tipo Absorbedor Puntual en un Microprocesador,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [119] M. Blanco, « Estimación de parámetros de funcionamiento: Establecimiento de condiciones límite en la situación de frenado,» Centro de Investigaciones energéticas y medio ambientales (CIEMAT), Madrid.
- [120] P. Ledesma, «Regulación de frecuencia y potencia,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2008.
- [121] I. Egido, F. Fernandez-Bernal, L. Rouco, E. Porras y A. Saiz-Chicharro, «Modeling of thermal generating units for automatic generation control purposes,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, n<sup>o</sup> 1, pp. 205-210, 2004.
- [122] T. Inoue, H. Taniguchi, Y. Ikeguchi y K. Yoshida, «Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients,» *IEEE Transactions on Power Systems*,, vol. 12, n<sup>o</sup> 1, pp. 136-143, 1997.
- [123] P. Wall, F. González-Longatt y V. Terzija, «Demonstration of an inertia constant estimation method through simulation,» de *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2010.
- [124] IDAE, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima ( PNIEC) 2021-2030,» [En línea]. Available: <https://idaes.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>.
- [125] R. E. E. (REE), «Datos seguimiento de la demanda de la energía eléctrica isla de Tenerife,» 2020. [En línea]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/canarias/tenerife/total>.

- [126] S. F. Manuel, «Introducción al análisis multivariante,» Universidad de Zaragoza. , [En línea]. Available: <http://www.5campus.com/leccion/anamul>.
- [127] «STATGRAPHICS Centurion XVIII,» [En línea]. Available: <https://statgraphics.net/>.
- [128] S. C. Borrás, «Fundamentos de la teoría de filtros,» Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [129] «Maxwell Technologies Ultracapacitors and Supercapacitors,» [En línea]. Available: <https://www.maxwell.com/>.
- [130] K. M. V. F. V. V. V. K. P. B. B. H. J. Alam, «Energy Storage Technology and Cost Characterization Report,» U.S Department of Energy, Julio 2019.
- [131] «LIMPET: Land Installed Marine Powered Energy Transformer,» 2000. [En línea]. Available: <https://blogs.ei.columbia.edu/2010/05/19/limpet-land-installed-marine-powered-energy-transformer/>.
- [132] E. Commission, «Ocean Energy Conversion in Europe,» Centre for Renewable Energy Sources , 2006.
- [133] T. Thorpe, «The wave energy programme in the UK and European Wave Energy Network,» de *4th European Wave Energy Conference (EWEC)* , Aalborg Dinamarca, 2000.
- [134] «Aquaret.Waves. AquaRET Text Book,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.aquaret.com/>.
- [135] R. Veloso y R. Castro, «Contributions to the Technical Assessment of Wave Energy in Portugal: The Case of Pico (Azores),» vol. 13, nº 9, pp. 2922-2927, 2015.
- [136] A. J. Garrido, I. Garrido, J. Lekube, M. de la Sen y E. Carrascal, «OWC on-shore wave power plants modeling and simulation,» de *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)*, 2016.
- [137] C. L. H. Alan, D. Kenneth, V. H. Jos, Kaye.D, Naylor.D, Bourdier.Sylvain y Whittaker.Trevor, «Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter,» de *3rd International Conference on Ocean Energy*, Bilbao, 2010.
- [138] «Seabased,» [En línea]. Available: <https://www.seabased.com/>.
- [139] A. Têtu, «Power Take-Off Systems for WECs,» de *Handbook of Ocean Wave Energy* , Springer Link, 2016, pp. 203-220.
- [140] K.-S. Choi, D.-S. Yang, S.-Y. Park y B.-H. Cho, «Desing and performance text of hydraulic PTO for wave energy converter,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,, vol. 13, nº 5, pp. 795 - 801, 2012.

- 
- [141] W. Sheng y A. Lewis, «Power Take Off Optimization for Maximizing Energy Conversion of Wave-Activated Bodies,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, n° 3, pp. 529-540, 2016.
- [142] W. Sheng y A. Lewis, «Power Take Off Optimization to Maximize Wave Energy Conversions for Oscillating Water Column Devices,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 43, n° 1, pp. 36-47, 2018.
- [143] R. So, S. Casey, S. Kanner, A. Simmons y T. K. A. Brekken, «PTO-Sim: Development of power take off modelling tool for ocean wave energy conversion,» de *IEEE Power and Energy Society General Meeting*,, 2015.
- [144] Y. Wei, J. Barradas-Berglind, M. van Rooij, W. Prins, B. Jayawardhana y A. Vakis, «Investigating the adaptability of the multi-pump multi-piston power take off system for a novel wave energy converter,» *Renewable Energy*,, vol. 111, pp. 598 - 610, 2017.
- [145] T. Taniguchi, J. Umeda, T. Fujiwara, H. Goto y S. Inoue, «Experimental and numerical study on point absorber type wave energy converter with linear generator,» de *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2017.
- [146] V. Antipov, A. Grozov y A. Ivanova, «A linear synchronous generator with a power of 30kW for wave-power engineering,» *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, n° 2, pp. 55 - 60, 2017.
- [147] Z.-Q. Zheng, P. Huang, D.-X. Gao y Z.-Y. Chang, «Analysis of electromagnetic force the linear generator in point absorber wave energy converters,» *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, vol. 23, n° 4, pp. 475 - 480, 2015.
- [148] S. Bozzi, A. M. Miquel, A. Antonini, G. Passoni y R. Archetti, «Modeling of a point absorber for energy conversion in Italian seas,» *Energies*, vol. 6, n° 6, pp. 3033 - 3051, 2013.
- [149] M. Lafoz, M. Blanco y D. Ramirez, «Grid connection for wave power farms,» de *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011.
- [150] C. Guedes Soares, A. R. Bento, M. Gonçalves, D. Silva y P. Martinho, «Numerical evaluation of the wave energy resource along the Atlantic European coast,» *Computers and Geosciences*, vol. 71, pp. 37 - 49, 2014.
- [151] L. Rusu y C. Guedes Soares, «Wave energy assessments in the Azores Islands,» *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 183 - 196, 2012.
- [152] A. García, «Renewable Energy Potential of Small Island States,» Global Energy Network Institute (GENI) , 2008.

- [153] R. Yemm, D. Pizer, C. Retzler y R. Henderson, «Pelamis: experience from concept to connection,» *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, n° 1959, pp. 365 - 380, 2012.
- [154] M. M. Moarefdoost, L. V. Snyder y B. Alnajjab, «Layouts for ocean wave energy farms: Models, properties and optimization,» *Omega*, vol. 66, pp. 185 - 194, 2017.
- [155] A. de Andrés, R. Guanche, L. Meneses, C. Vidal y I. Losada, «Factors that influence array layout on wave energy farms,» *Ocean Engineering*, vol. 82, pp. 32 - 41, 2014.
- [156] A. Blavette, D. L. O'Sullivan, R. Alcorn, M. G. Egan y T. W. Lewis, «Simplified Estimation of Flicker Level Induced by Wave Energy,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, n° 3, pp. 1216 - 1223, 2016.
- [157] H. Kweon y J. Lee, «An array effect of wave energy farm buoys,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF NAVAL ARCHITECTURE AND OCEAN ENGINEERING*, vol. 4, n° 4, pp. 437 - 446, 2012.
- [158] A. Babarit, «Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters,» *Ocean Engineering*, vol. 37, n° 8, pp. 718 - 729, 2010.
- [159] B. Borgarino, A. Babarit y P. Ferrant, «Impact of wave interactions effects on energy absorption in large arrays of wave energy converters,» *Ocean Engineering*, vol. 41, pp. 79 - 88, 2012.
- [160] T. Kovaltchouk, S. Armstrong, A. Blavette, H. Ben Ahmed y B. Multon, «Wave farm flicker severity: comparative analysis and solutions,» *Renewable Energy*, vol. 91, pp. 32 - 39, 2016.
- [161] A. Nambiar, D. Forehand, A. Kiprakis y A. Wallace, «Effects of spacing in wave energy converter arrays on voltage flicker,» de *5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, London U.K, 2016.
- [162] S. Armstrong, E. Cotilla-Sanchez y T. Kovaltchouk, «Assessing the Impact of the Grid-Connected Pacific Marine Energy Center Wave Farm,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, n° 4, pp. 1011 - 1020, 2015.
- [163] M. Lafoz, M. Blanco y D. Ramirez, «Grid connection for wave energy farms,» de *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011.
- [164] P. Moreno-Torres, M. Blanco, G. Navarro y M. Lafoz, «Power smoothing system for wave energy converters by means of a supercapacitors-based energy storage system,» de *17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 2015.

- [165] A. F. d. O.Falcão, «Wave energy utilization: A review of the technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 899-918, 2010.
- [166] [En línea].
- [167] G. Iglesias y R. Carballo, «Wave resource in El Hierro- an islands towards energy self-sufficiency,» *Renewable Energy*, vol. 36, n° 2, pp. 689-698, 2011.





## 11 Anexos.

---

*Anexo Capítulo 5*

*Desarrollo de Modelos*

---

## Evaluación Recurso del Oleaje.

Datos puntos SIMAR Puertos del Estado.

### *Isla de Gran Canaria*

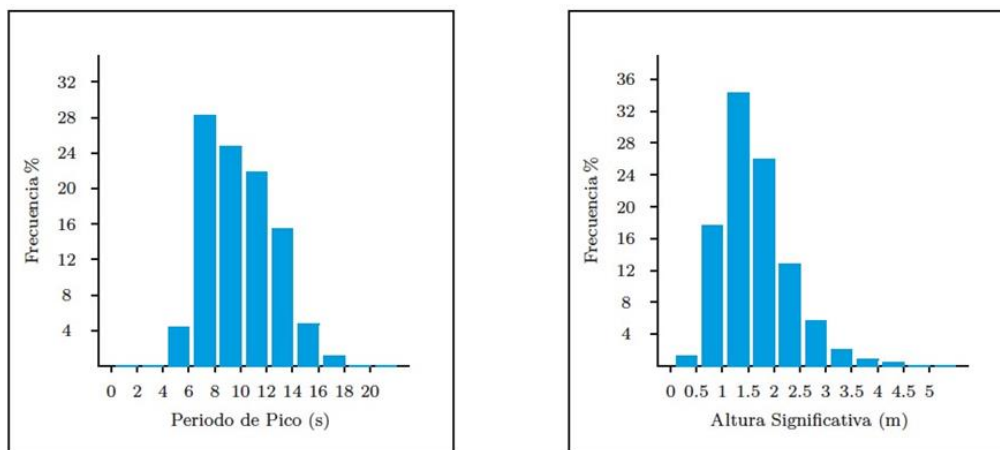


Tabla Periodo de Pico (Tp) - Altura Significativa (Hs) en %

Hs (m)	Tp (s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0.023	0.148	0.293	0.321	0.202	0.059	0.009	0.006	0.001	-	1.062
1.0	-	0.041	1.789	5.162	5.104	3.899	1.308	0.197	0.051	0.006	0.001	17.559
1.5	-	0.005	2.095	10.639	8.278	8.086	4.125	0.760	0.144	0.017	0.001	34.150
2.0	-	-	0.208	9.025	5.229	5.575	4.364	1.050	0.220	0.034	0.003	25.709
2.5	-	-	0.002	2.819	3.165	2.572	3.051	0.996	0.219	0.029	0.008	12.862
3.0	-	-	-	0.349	1.634	0.869	1.669	0.721	0.193	0.031	0.003	5.470
3.5	-	-	-	0.014	0.614	0.240	0.620	0.427	0.134	0.019	0.002	2.071
4.0	-	-	-	-	0.102	0.121	0.227	0.194	0.056	0.009	0.001	0.710
4.5	-	-	-	-	0.018	0.046	0.056	0.109	0.024	0.005	-	0.258
5.0	-	-	-	-	0.002	0.022	0.014	0.041	0.015	0.001	-	0.096
> 5.0	-	-	-	-	-	0.003	0.009	0.024	0.016	-	-	0.053
<b>Total</b>	-	0.069	4.243	28.302	24.467	21.637	15.503	4.529	1.078	0.153	0.020	100 %

Figura 108. Datos para Gran Canaria Norte. SIMAR 4035011.

*Isla de Tenerife*

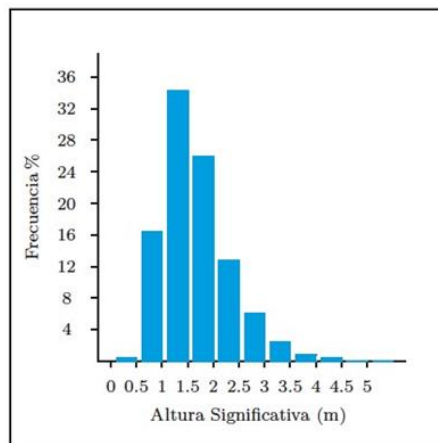
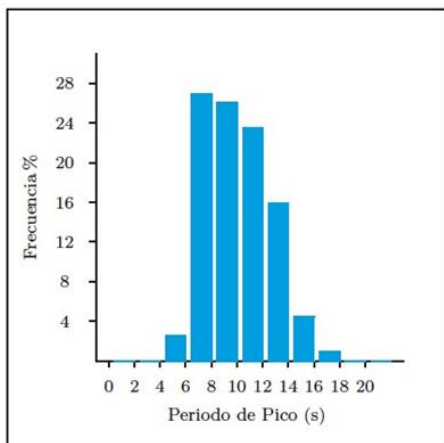


Tabla Periodo de Pico (Tp) - Altura Significativa (Hs) en %

Hs (m)	Tp (s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0.005	0.104	0.240	0.109	0.076	0.028	0.005	0.002	-	-	0.571
1.0	-	0.012	1.510	6.134	5.140	2.504	0.754	0.129	0.039	0.004	0.001	16.227
1.5	-	0.002	0.945	11.378	9.866	8.344	3.050	0.529	0.112	0.011	0.002	34.238
2.0	-	0.002	0.045	7.395	5.712	7.120	4.526	0.869	0.189	0.026	0.002	25.886
2.5	-	-	0.002	1.628	3.199	3.374	3.493	0.970	0.192	0.029	0.006	12.892
3.0	-	-	-	0.117	1.412	1.215	2.217	0.823	0.185	0.028	0.003	6.001
3.5	-	-	-	0.005	0.368	0.396	0.976	0.542	0.154	0.023	0.003	2.467
4.0	-	-	-	-	0.058	0.144	0.402	0.273	0.098	0.010	-	0.986
4.5	-	-	-	-	0.010	0.063	0.158	0.151	0.032	0.006	-	0.421
5.0	-	-	-	-	-	0.017	0.058	0.076	0.020	0.003	-	0.176
> 5.0	-	-	-	-	-	0.004	0.027	0.076	0.028	-	-	0.135
<b>Total</b>	-	0.021	2.607	26.897	25.875	23.257	15.690	4.444	1.051	0.141	0.019	<b>100 %</b>

Figura 109. Datos para Tenerife Norte. SIMAR 4021014.



---

*Anexo Capítulo 6*

*Análisis de la estabilidad de la frecuencia*

---

## Tablas Resultados Escenarios de Generación y Simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife.

### *Resultados de la integración de 1 parque undimotriz (10MW)*

Hs(m)	Tp(s)	ángulo $\alpha$ (°)	n° filas	Pconv (MW)	n° Eventos totales	Subfrecuencia	Sobrefrecuencia	Alerta	Emergencia
2,5	15	0	1	350	826	0	826	0	0
2,5	15	0	2	350	203	0	203	0	0
2,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	350	2436	0	2436	0	0
2,5	12	0	2	350	425	0	425	0	0
2,5	12	0	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0

2,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0

2,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	280	2439	0	2439	0	0
2,5	15	0	2	280	798	0	798	0	0
2,5	15	0	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	280	4916	0	4916	0	0
2,5	12	0	2	280	1279	0	1279	0	0
2,5	12	0	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	0	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0



2,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0

2,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	250	3682	0	3682	0	0
2,5	15	0	2	250	1120	0	1120	0	0
2,5	15	0	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	250	6623	0	6623	0	0
2,5	12	0	2	250	2055	0	2055	0	0
2,5	12	0	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0

2,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0

2,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	450	343	0	343	0	0
2,5	15	0	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	450	734	0	734	0	0
2,5	12	0	2	450	31	0	31	0	0
2,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0

2,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0

2,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0

Tabla 21. Resultados escenarios de generación y simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife 1 Parque (10MW).

---

*Resultados de la integración de 2 parques undimotriz (20MW)*


---

Hs(m)	Tp(s)	ángulo $\alpha$ (°)	n° filas	Pconv (MW)	n° Eventos totales	Subfrecuencia	Sobrefrecuencia	Alerta	Emergencia
2,5	15	0	1	350	8469	0	8469	150	0
2,5	15	0	2	350	2802	0	2802	0	0
2,5	15	0	5	350	39	0	39	0	0
2,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	350	13769	0	13769	317	0
2,5	12	0	2	350	6315	0	6315	0	0
2,5	12	0	5	350	423	0	423	0	0
2,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	350	200	0	200	0	0
1,5	15	0	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0

2,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0



1,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	280	13626	125	13501	407	0
2,5	15	0	2	280	5573	0	5573	0	0
2,5	15	0	5	280	496	0	496	0	0
2,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	280	20950	187	20763	1055	0
2,5	12	0	2	280	11465	66	11399	72	0
2,5	12	0	5	280	2310	0	2310	0	0
2,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	280	478	0	478	0	0
1,5	15	0	2	280	46	0	46	0	0
1,5	15	0	5	280	0	0	0	0	0

1,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	280	1651	0	1651	0	0
1,5	12	0	2	280	97	0	97	0	0
1,5	12	0	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0

1,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	250	16938	350	16588	658	0
2,5	15	0	2	250	8262	0	8262	82	0
2,5	15	0	5	250	988	0	988	0	0
2,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0

2,5	12	0	1	250	25571	507	25064	1940	132
2,5	12	0	2	250	15301	207	15094	169	0
2,5	12	0	5	250	3953	0	3953	0	0
2,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	250	846	0	846	0	0
1,5	15	0	2	250	196	0	196	0	0
1,5	15	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	250	2475	0	2475	0	0
1,5	12	0	2	250	420	0	420	0	0
1,5	12	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0

2,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0

1,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	450	4802	0	4802	0	0
2,5	15	0	2	450	1388	0	1388	0	0
2,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	450	8495	0	8495	21	0
2,5	12	0	2	450	2884	0	2884	0	0
2,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	450	126	0	126	0	0
1,5	12	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0

2,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0

2,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0

Tabla 22. Resultados escenarios de generación y simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife 2 Parques (20MW).



*Resultados de la integración de 3 parques undimotriz (30MW)*

Hs(m)	Tp(s)	ángulo $\alpha$ (°)	n° filas	Pconv (MW)	n° Eventos totales	Subfrecuencia	Sobrefrecuencia	Alerta	Emergencia
2,5	15	0	1	350	18840	452	18388	818	0
2,5	15	0	2	350	9834	0	9834	175	0
2,5	15	0	5	350	1422	0	1422	0	0
2,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	350	28861	937	27924	2418	183
2,5	12	0	2	350	17631	316	17315	363	0
2,5	12	0	5	350	5067	0	5067	0	0
2,5	12	0	10	350	107	0	107	0	0
1,5	15	0	1	350	1091	0	1091	0	0
1,5	15	0	2	350	248	0	248	0	0
1,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	350	3050	0	3050	0	0
1,5	12	0	2	350	672	0	672	0	0
1,5	12	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0

2,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0

1,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	280	27252	1543	25709	2412	286
2,5	15	0	2	280	16998	360	16638	768	0
2,5	15	0	5	280	3511	0	3511	0	0
2,5	15	0	10	280	254	0	254	0	0
2,5	12	0	1	280	40493	2978	37515	4773	580
2,5	12	0	2	280	27079	1083	25996	1251	0
2,5	12	0	5	280	10219	0	10219	0	0
2,5	12	0	10	280	1249	0	1249	0	0
1,5	15	0	1	280	3233	0	3233	0	0
1,5	15	0	2	280	1007	0	1007	0	0
1,5	15	0	5	280	0	0	0	0	0

1,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	280	6109	0	6109	0	0
1,5	12	0	2	280	1696	0	1696	0	0
1,5	12	0	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	280	107	0	107	0	0
2,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0

1,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	250	32215	2388	29827	3615	411
2,5	15	0	2	250	21920	688	21232	1094	0
2,5	15	0	5	250	5616	0	5616	0	0
2,5	15	0	10	250	718	0	718	0	0

2,5	12	0	1	250	48365	5851	42514	6496	1088
2,5	12	0	2	250	32981	1959	31022	1948	76
2,5	12	0	5	250	14094	188	13906	0	0
2,5	12	0	10	250	2544	0	2544	0	0
1,5	15	0	1	250	4492	0	4492	0	0
1,5	15	0	2	250	1305	0	1305	0	0
1,5	15	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	250	8190	0	8190	0	0
1,5	12	0	2	250	2701	0	2701	0	0
1,5	12	0	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	250	67	0	67	0	0
2,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0

2,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	250	206	0	206	0	0
2,5	12	-20	2	250	122	0	122	0	0
2,5	12	-20	5	250	109	0	109	0	0
2,5	12	-20	10	250	81	0	81	0	0
1,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0

1,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	450	11708	50	11658	334	0
2,5	15	0	2	450	4600	0	4600	0	0
2,5	15	0	5	450	212	0	212	0	0
2,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	0	1	450	18323	70	18253	727	0
2,5	12	0	2	450	9458	38	9420	30	0
2,5	12	0	5	450	1364	0	1364	0	0
2,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	1	450	406	0	406	0	0
1,5	15	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	450	406	0	406	0	0
1,5	12	0	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0



1,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0

2,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0

Tabla 23. Resultados escenarios de generación y simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife 3 Parques (30MW).

---

*Resultados de la integración de 4 parques undimotriz (40MW)*


---

2,5	15	0	1	350	29946	2039	27907	3082	364
2,5	15	0	2	350	19593	521	19072	959	0
2,5	15	0	5	350	4425	0	4425	0	0
2,5	15	0	10	350	469	0	469	0	0
2,5	12	0	1	350	44917	4602	40315	5705	844
2,5	12	0	2	350	30132	1522	28610	1678	52
2,5	12	0	5	350	12228	109	12119	0	0
2,5	12	0	10	350	1837	0	1837	0	0
1,5	15	0	1	350	3992	0	3992	0	0
1,5	15	0	2	350	1151	0	1151	0	0
1,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	350	7177	0	7177	0	0
1,5	12	0	2	350	2199	0	2199	0	0
1,5	12	0	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0

2,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	-20	1	350	141	0	141	0	0
2,5	12	-20	2	350	80	0	80	0	0
2,5	12	-20	5	350	47	0	47	0	0
2,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0

1,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
2,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	280	42014	4963	37051	5646	817
2,5	15	0	2	280	29827	1826	28001	1535	171
2,5	15	0	5	280	9783	255	9528	0	0
2,5	15	0	10	280	2617	0	2617	0	0
2,5	12	0	1	280	66447	15500	50947	9785	2416
2,5	12	0	2	280	45781	6722	39059	3615	363
2,5	12	0	5	280	20637	688	19949	0	0
2,5	12	0	10	280	6289	0	6289	0	0
1,5	15	0	1	280	6789	0	6789	0	0
1,5	15	0	2	280	1986	0	1986	0	0
1,5	15	0	5	280	0	0	0	0	0

1,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	280	11522	0	11522	186	0
1,5	12	0	2	280	4674	0	4674	0	0
1,5	12	0	5	280	98	0	98	0	0
1,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	280	20	0	20	0	0
2,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
2,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	280	1047	0	1047	0	0
2,5	12	20	2	280	38	0	38	0	0
2,5	12	20	5	280	104	0	104	0	0
2,5	12	20	10	280	149	0	149	0	0
1,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	280	119	0	119	0	0
2,5	15	-20	2	280	97	0	97	0	0
2,5	15	-20	5	280	214	0	214	0	0
2,5	15	-20	10	280	35	0	35	0	0
2,5	12	-20	1	280	622	0	622	0	0
2,5	12	-20	2	280	293	0	293	0	0
2,5	12	-20	5	280	231	0	231	0	0
2,5	12	-20	10	280	353	0	353	0	0
1,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0

1,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	280	101	0	101	0	0
2,5	15	45	2	280	32	0	32	0	0
2,5	15	45	5	280	446	0	446	0	0
2,5	15	45	10	280	3264	0	3264	0	0
2,5	12	45	1	280	555	0	555	0	0
2,5	12	45	2	280	1482	0	1482	0	0
2,5	12	45	5	280	4016	0	4016	0	0
2,5	12	45	10	280	11058	252	10806	0	0
1,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	280	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	250	50605	8456	42149	7288	1246
2,5	15	0	2	250	35767	3343	32424	2149	374
2,5	15	0	5	250	14566	727	13839	0	0
2,5	15	0	10	250	4385	0	4385	0	0

2,5	12	0	1	250	82704	26528	56176	12003	3507
2,5	12	0	2	250	57806	13134	44672	5015	871
2,5	12	0	5	250	27169	2047	25122	71	0
2,5	12	0	10	250	10414	0	10414	0	0
1,5	15	0	1	250	8814	0	8814	122	0
1,5	15	0	2	250	2950	0	2950	0	0
1,5	15	0	5	250	71	0	71	0	0
1,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	250	14160	0	14160	323	0
1,5	12	0	2	250	6584	0	6584	0	0
1,5	12	0	5	250	476	0	476	0	0
1,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	250	159	0	159	0	0
2,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	250	58	0	58	0	0
2,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	250	1684	0	1684	0	0
2,5	12	20	2	250	499	0	499	0	0
2,5	12	20	5	250	300	0	300	0	0
2,5	12	20	10	250	621	0	621	0	0
1,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	250	183	0	183	0	0



2,5	15	-20	2	250	158	0	158	0	0
2,5	15	-20	5	250	377	0	377	0	0
2,5	15	-20	10	250	274	0	274	0	0
2,5	12	-20	1	250	1168	0	1168	0	0
2,5	12	-20	2	250	863	0	863	0	0
2,5	12	-20	5	250	899	0	899	0	0
2,5	12	-20	10	250	1251	0	1251	0	0
1,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	250	142	0	142	0	0
2,5	15	45	2	250	105	0	105	0	0
2,5	15	45	5	250	1256	0	1256	0	0
2,5	15	45	10	250	5181	0	5181	0	0
2,5	12	45	1	250	1106	0	1106	0	0
2,5	12	45	2	250	2108	0	2108	0	0
2,5	12	45	5	250	6800	0	6800	0	0
2,5	12	45	10	250	15361	365	14996	74	0
1,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0

1,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	250	0	0	0	0	0
2,5	15	0	1	450	50605	8456	42149	7288	1246
2,5	15	0	2	450	35767	3343	32424	2149	374
2,5	15	0	5	450	14566	727	13839	0	0
2,5	15	0	10	450	4385	0	4385	0	0
2,5	12	0	1	450	82704	26528	56176	12003	3507
2,5	12	0	2	450	18944	397	18547	503	0
2,5	12	0	5	450	27169	2047	25122	71	0
2,5	12	0	10	450	10414	0	10414	0	0
1,5	15	0	1	450	8814	0	8814	122	0
1,5	15	0	2	450	2950	0	2950	0	0
1,5	15	0	5	450	71	0	71	0	0
1,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	0	1	450	14160	0	14160	323	0
1,5	12	0	2	450	6584	0	6584	0	0
1,5	12	0	5	450	476	0	476	0	0
1,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	1	450	159	0	159	0	0
2,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
2,5	15	20	5	450	58	0	58	0	0
2,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	12	20	1	450	1684	0	1684	0	0
2,5	12	20	2	450	499	0	499	0	0
2,5	12	20	5	450	300	0	300	0	0
2,5	12	20	10	450	621	0	621	0	0
1,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0

1,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	-20	1	450	183	0	183	0	0
2,5	15	-20	2	450	158	0	158	0	0
2,5	15	-20	5	450	377	0	377	0	0
2,5	15	-20	10	450	274	0	274	0	0
2,5	12	-20	1	450	1168	0	1168	0	0
2,5	12	-20	2	450	863	0	863	0	0
2,5	12	-20	5	450	899	0	899	0	0
2,5	12	-20	10	450	1251	0	1251	0	0
1,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0
2,5	15	45	1	450	142	0	142	0	0
2,5	15	45	2	450	105	0	105	0	0
2,5	15	45	5	450	1256	0	1256	0	0
2,5	15	45	10	450	5181	0	5181	0	0
2,5	12	45	1	450	1106	0	1106	0	0
2,5	12	45	2	450	2108	0	2108	0	0

2,5	12	45	5	450	6800	0	6800	0	0
2,5	12	45	10	450	15361	365	14996	74	0
1,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0
1,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0

Tabla 24. Resultados escenarios de generación y simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife 4 Parques (40MW).

*Resultados de la integración de 5 parques undimotriz (50MW)*

Hs(m)	Tp(s)	ángulo $\alpha$ (°)	n° filas	Pconv (MW)	n° Eventos totales	Subfrecuencia	Sobrefrecuencia	Alerta	Emergencia	Energía Parque (MWh)
2,5	15	0	1	350	41909	4970	36939	5617	817	0,031638889
2,5	15	0	2	350	29744	1831	27913	1533	169	0,03175
2,5	15	0	5	350	9619	255	9364	0	0	0,031777778
2,5	15	0	10	350	2533	0	2533	0	0	0,03175
2,5	12	0	1	350	66350	15515	50835	9750	2415	0,044888889
2,5	12	0	2	350	28592	1339	27253	1457	30	0,044888889
2,5	12	0	5	350	20469	688	19781	0	0	0,044694444
2,5	12	0	10	350	5979	0	5979	0	0	0,044333333
1,5	15	0	1	350	6760	0	6760	0	0	0,011386111
1,5	15	0	2	350	1964	0	1964	0	0	0,011427778
1,5	15	0	5	350	0	0	0	0	0	0,011444444
1,5	15	0	10	350	0	0	0	0	0	0,011436111
1,5	12	0	1	350	11447	0	11447	182	0	0,016158333
1,5	12	0	2	350	4602	0	4602	0	0	0,016155556
1,5	12	0	5	350	43	0	43	0	0	0,0161
1,5	12	0	10	350	0	0	0	0	0	0,015966667
2,5	15	20	1	350	20	0	20	0	0	0,030583333
2,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0	0,030916667
2,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0	0,031611111
2,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0	0,031777778
2,5	12	20	1	350	986	0	986	0	0	0,044472222
2,5	12	20	2	350	38	0	38	0	0	0,044138889
2,5	12	20	5	350	104	0	104	0	0	0,044472222
2,5	12	20	10	350	149	0	149	0	0	0,044416667
1,5	15	20	1	350	0	0	0	0	0	0,011011111

1,5	15	20	2	350	0	0	0	0	0	0,011133333
1,5	15	20	5	350	0	0	0	0	0	0,011388889
1,5	15	20	10	350	0	0	0	0	0	0,011441667
1,5	12	20	1	350	0	0	0	0	0	0,016011111
1,5	12	20	2	350	0	0	0	0	0	0,015897222
1,5	12	20	5	350	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	20	10	350	0	0	0	0	0	0,016
2,5	15	-20	1	350	119	0	119	0	0	0,031527778
2,5	15	-20	2	350	97	0	97	0	0	0,031583333
2,5	15	-20	5	350	214	0	214	0	0	0,031805556
2,5	15	-20	10	350	35	0	35	0	0	0,031722222
2,5	12	-20	1	350	588	0	588	0	0	0,0445
2,5	12	-20	2	350	282	0	282	0	0	0,044055556
2,5	12	-20	5	350	231	0	231	0	0	0,044194444
2,5	12	-20	10	350	306	0	306	0	0	0,044166667
1,5	15	-20	1	350	0	0	0	0	0	0,011352778
1,5	15	-20	2	350	0	0	0	0	0	0,011375
1,5	15	-20	5	350	0	0	0	0	0	0,011452778
1,5	15	-20	10	350	0	0	0	0	0	0,011433333
1,5	12	-20	1	350	0	0	0	0	0	0,016027778
1,5	12	-20	2	350	0	0	0	0	0	0,015866667
1,5	12	-20	5	350	0	0	0	0	0	0,015922222
1,5	12	-20	10	350	0	0	0	0	0	0,015908333
2,5	15	45	1	350	101	0	101	0	0	0,030972222
2,5	15	45	2	350	32	0	32	0	0	0,030583333
2,5	15	45	5	350	408	0	408	0	0	0,031222222
2,5	15	45	10	350	3206	0	3206	0	0	0,031666667
2,5	12	45	1	350	555	0	555	0	0	0,044333333
2,5	12	45	2	350	1431	0	1431	0	0	0,0445
2,5	12	45	5	350	3889	0	3889	0	0	0,044277778
2,5	12	45	10	350	10881	252	10629	0	0	0,044527778

1,5	15	45	1	350	0	0	0	0	0	0,011152778
1,5	15	45	2	350	0	0	0	0	0	0,011013889
1,5	15	45	5	350	0	0	0	0	0	0,011013889
1,5	15	45	10	350	0	0	0	0	0	0,011405556
1,5	12	45	1	350	0	0	0	0	0	0,015961111
1,5	12	45	2	350	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	45	5	350	0	0	0	0	0	0,015947222
1,5	12	45	10	350	0	0	0	0	0	0,016038889
2,5	15	0	1	280	60379	13368	47011	9167	2409	0,031638889
2,5	15	0	2	280	42466	5524	36942	3217	760	0,03175
2,5	15	0	5	280	19371	1149	18222	0	0	0,031777778
2,5	15	0	10	280	6464	54	6410	0	0	0,03175
2,5	12	0	1	280	102188	41447	60741	14781	4753	0,044888889
2,5	12	0	2	280	71796	21370	50426	6741	1247	0,044888889
2,5	12	0	5	280	35089	4684	30405	527	0	0,044694444
2,5	12	0	10	280	15177	122	15055	0	0	0,044333333
1,5	15	0	1	280	11093	0	11093	228	0	0,011386111
1,5	15	0	2	280	4297	0	4297	0	0	0,011427778
1,5	15	0	5	280	183	0	183	0	0	0,011444444
1,5	15	0	10	280	0	0	0	0	0	0,011436111
1,5	12	0	1	280	17296	27	17269	472	0	0,016158333
1,5	12	0	2	280	8606	0	8606	0	0	0,016155556
1,5	12	0	5	280	1223	0	1223	0	0	0,0161
1,5	12	0	10	280	0	0	0	0	0	0,015966667
2,5	15	20	1	280	366	0	366	0	0	0,030583333
2,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0	0,030916667
2,5	15	20	5	280	117	0	117	0	0	0,031611111
2,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0	0,031777778
2,5	12	20	1	280	2628	0	2628	0	0	0,044472222

2,5	12	20	2	280	943	0	943	0	0	0,044138889
2,5	12	20	5	280	844	0	844	0	0	0,044472222
2,5	12	20	10	280	1287	0	1287	0	0	0,044416667
1,5	15	20	1	280	0	0	0	0	0	0,011011111
1,5	15	20	2	280	0	0	0	0	0	0,011133333
1,5	15	20	5	280	0	0	0	0	0	0,011388889
1,5	15	20	10	280	0	0	0	0	0	0,011441667
1,5	12	20	1	280	0	0	0	0	0	0,016011111
1,5	12	20	2	280	0	0	0	0	0	0,015897222
1,5	12	20	5	280	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	20	10	280	0	0	0	0	0	0,016
2,5	15	-20	1	280	332	0	332	0	0	0,031527778
2,5	15	-20	2	280	313	0	313	0	0	0,031583333
2,5	15	-20	5	280	419	0	419	0	0	0,031805556
2,5	15	-20	10	280	351	0	351	0	0	0,031722222
2,5	12	-20	1	280	1752	0	1752	0	0	0,0445
2,5	12	-20	2	280	1615	0	1615	0	0	0,044055556
2,5	12	-20	5	280	2316	0	2316	0	0	0,044194444
2,5	12	-20	10	280	2201	0	2201	0	0	0,044166667
1,5	15	-20	1	280	0	0	0	0	0	0,011352778
1,5	15	-20	2	280	0	0	0	0	0	0,011375
1,5	15	-20	5	280	0	0	0	0	0	0,011452778
1,5	15	-20	10	280	0	0	0	0	0	0,011433333
1,5	12	-20	1	280	0	0	0	0	0	0,016027778
1,5	12	-20	2	280	0	0	0	0	0	0,015866667
1,5	12	-20	5	280	0	0	0	0	0	0,015922222
1,5	12	-20	10	280	0	0	0	0	0	0,015908333
2,5	15	45	1	280	180	0	180	0	0	0,030972222



2,5	15	45	2	280	148	0	148	0	0	0,030583333
2,5	15	45	5	280	2328	0	2328	0	0	0,031222222
2,5	15	45	10	280	7958	0	7958	0	0	0,031666667
2,5	12	45	1	280	1777	0	1777	0	0	0,044333333
2,5	12	45	2	280	2619	0	2619	0	0	0,0445
2,5	12	45	5	280	10960	131	10829	0	0	0,044277778
2,5	12	45	10	280	21051	920	20131	195	0	0,044527778
1,5	15	45	1	280	0	0	0	0	0	0,011152778
1,5	15	45	2	280	0	0	0	0	0	0,011013889
1,5	15	45	5	280	0	0	0	0	0	0,011241667
1,5	15	45	10	280	0	0	0	0	0	0,011405556
1,5	12	45	1	280	0	0	0	0	0	0,015961111
1,5	12	45	2	280	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	45	5	280	0	0	0	0	0	0,015947222
1,5	12	45	10	280	316	0	316	0	0	0,016038889
2,5	15	0	1	250	74241	22185	52056	11607	3611	0,031638889
2,5	15	0	2	250	52253	10320	41933	4555	1086	0,03175
2,5	15	0	5	250	24391	1899	22492	201	0	0,031777778
2,5	15	0	10	250	10215	410	9805	0	0	0,03175
2,5	12	0	1	250	128116	62478	65638	18250	6476	0,044888889
2,5	12	0	2	250	91702	34896	56806	9335	1940	0,044888889
2,5	12	0	5	250	45429	8828	36601	1264	0	0,044694444
2,5	12	0	10	250	21598	1060	20538	0	0	0,044333333
1,5	15	0	1	250	13887	97	13790	401	0	0,011386111
1,5	15	0	2	250	5799	0	5799	0	0	0,011427778
1,5	15	0	5	250	444	0	444	0	0	0,011444444
1,5	15	0	10	250	0	0	0	0	0	0,011436111
1,5	12	0	1	250	21416	170	21246	1043	0	0,016158333
1,5	12	0	2	250	11759	62	11697	62	67	0,016155556

1,5	12	0	5	250	2373	0	2373	0	0	0,0161
1,5	12	0	10	250	0	0	0	0	0	0,015966667
2,5	15	20	1	250	602	0	602	0	0	0,030583333
2,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0	0,030916667
2,5	15	20	5	250	372	0	372	0	0	0,031611111
2,5	15	20	10	250	225	0	225	0	0	0,031777778
2,5	12	20	1	250	3757	0	3757	0	0	0,044472222
2,5	12	20	2	250	1794	0	1794	0	0	0,044138889
2,5	12	20	5	250	1713	0	1713	0	0	0,044472222
2,5	12	20	10	250	3163	0	3163	0	0	0,044416667
1,5	15	20	1	250	0	0	0	0	0	0,011011111
1,5	15	20	2	250	0	0	0	0	0	0,011133333
1,5	15	20	5	250	0	0	0	0	0	0,011388889
1,5	15	20	10	250	0	0	0	0	0	0,011441667
1,5	12	20	1	250	0	0	0	0	0	0,016011111
1,5	12	20	2	250	0	0	0	0	0	0,015897222
1,5	12	20	5	250	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	20	10	250	0	0	0	0	0	0,016
2,5	15	-20	1	250	672	0	672	0	0	0,031527778
2,5	15	-20	2	250	373	0	373	0	0	0,031583333
2,5	15	-20	5	250	810	0	810	0	0	0,031805556
2,5	15	-20	10	250	874	0	874	0	0	0,031722222
2,5	12	-20	1	250	3486	0	3486	0	0	0,0445
2,5	12	-20	2	250	2896	0	2896	0	0	0,044055556
2,5	12	-20	5	250	3611	0	3611	0	0	0,044194444
2,5	12	-20	10	250	4145	0	4145	0	0	0,044166667
1,5	15	-20	1	250	0	0	0	0	0	0,011352778
1,5	15	-20	2	250	0	0	0	0	0	0,011375

1,5	15	-20	5	250	0	0	0	0	0	0,011452778
1,5	15	-20	10	250	0	0	0	0	0	0,011433333
1,5	12	-20	1	250	0	0	0	0	0	0,016027778
1,5	12	-20	2	250	0	0	0	0	0	0,015866667
1,5	12	-20	5	250	0	0	0	0	0	0,015922222
1,5	12	-20	10	250	0	0	0	0	0	0,015908333
2,5	15	45	1	250	399	0	399	0	0	0,030972222
2,5	15	45	2	250	502	0	502	0	0	0,030583333
2,5	15	45	5	250	4474	0	4474	0	0	0,031222222
2,5	15	45	10	250	11534	99	11435	0	0	0,031666667
2,5	12	45	1	250	2631	0	2631	0	0	0,044333333
2,5	12	45	2	250	4281	0	4281	0	0	0,0445
2,5	12	45	5	250	16236	597	15639	0	0	0,044277778
2,5	12	45	10	250	28223	2161	26062	326	0	0,044527778
1,5	15	45	1	250	0	0	0	0	0	0,011152778
1,5	15	45	2	250	0	0	0	0	0	0,011013889
1,5	15	45	5	250	0	0	0	0	0	0,011241667
1,5	15	45	10	250	0	0	0	0	0	0,011405556
1,5	12	45	1	250	0	0	0	0	0	0,015961111
1,5	12	45	2	250	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	45	5	250	0	0	0	0	0	0,015947222
1,5	12	45	10	250	461	0	461	0	0	0,016038889
2,5	15	0	1	450	28697	1867	26830	2788	332	0,037194444
2,5	15	0	2	450	18213	448	17765	880	0	0,03175
2,5	15	0	5	450	3844	0	3844	0	0	0,031777778
2,5	15	0	10	450	335	0	335	0	0	0,03175
2,5	12	0	1	450	42889	3836	39053	5297	725	0,044888889
2,5	12	0	2	450	28592	1339	27253	1467	30	0,044888889
2,5	12	0	5	450	11138	60	11078	0	0	0,044694444
2,5	12	0	10	450	1459	0	1459	0	0	0,044333333

1,5	15	0	1	450	3640	0	3640	0	0	0,011386111
1,5	15	0	2	450	1085	0	1085	0	0	0,011427778
1,5	15	0	5	450	0	0	0	0	0	0,011444444
1,5	15	0	10	450	0	0	0	0	0	0,011436111
1,5	12	0	1	450	6609	0	6609	0	0	0,016158333
1,5	12	0	2	450	1955	0	1955	0	0	0,016155556
1,5	12	0	5	450	0	0	0	0	0	0,0161
1,5	12	0	10	450	0	0	0	0	0	0,015966667
2,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0	0,030583333
2,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0	0,030916667
2,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0	0,031611111
2,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0	0,031777778
2,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0	0,044472222
2,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0	0,044138889
2,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0	0,044472222
2,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0	0,044416667
1,5	15	20	1	450	0	0	0	0	0	0,011011111
1,5	15	20	2	450	0	0	0	0	0	0,011133333
1,5	15	20	5	450	0	0	0	0	0	0,011388889
1,5	15	20	10	450	0	0	0	0	0	0,011441667
1,5	12	20	1	450	0	0	0	0	0	0,016011111
1,5	12	20	2	450	0	0	0	0	0	0,015897222
1,5	12	20	5	450	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	20	10	450	0	0	0	0	0	0,016
2,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0	0,031527778
2,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0	0,031583333
2,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0	0,031805556

2,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0	0,031722222
2,5	12	-20	1	450	126	0	126	0	0	0,0445
2,5	12	-20	2	450	41	0	41	0	0	0,044055556
2,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0	0,044194444
2,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0	0,044166667
1,5	15	-20	1	450	0	0	0	0	0	0,011352778
1,5	15	-20	2	450	0	0	0	0	0	0,011375
1,5	15	-20	5	450	0	0	0	0	0	0,011452778
1,5	15	-20	10	450	0	0	0	0	0	0,011433333
1,5	12	-20	1	450	0	0	0	0	0	0,016027778
1,5	12	-20	2	450	0	0	0	0	0	0,015866667
1,5	12	-20	5	450	0	0	0	0	0	0,015922222
1,5	12	-20	10	450	0	0	0	0	0	0,015908333
2,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0	0,030972222
2,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0	0,030583333
2,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0	0,031222222
2,5	15	45	10	450	881	0	881	0	0	0,031666667
2,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0	0,044333333
2,5	12	45	2	450	639	0	639	0	0	0,0445
2,5	12	45	5	450	741	0	741	0	0	0,044277778
2,5	12	45	10	450	4329	0	4329	0	0	0,044527778
1,5	15	45	1	450	0	0	0	0	0	0,011152778
1,5	15	45	2	450	0	0	0	0	0	0,011013889
1,5	15	45	5	450	0	0	0	0	0	0,011241667
1,5	15	45	10	450	0	0	0	0	0	0,011405556
1,5	12	45	1	450	0	0	0	0	0	0,015961111
1,5	12	45	2	450	0	0	0	0	0	0,016022222
1,5	12	45	5	450	0	0	0	0	0	0,015947222
1,5	12	45	10	450	0	0	0	0	0	0,016038889

Tabla 25. Resultados escenarios de generación y simulaciones Red Eléctrica de isla de Tenerife 5 Parques (50MW).



## Características Sistema Eléctrico isla Tenerife (Horizonte 2020).

### *Parque de Generación Convencional isla de Tenerife Horizonte 2020.*

Central eléctrica	Grupo de generación	Potencia activa (MW)	Potencia aparente (MVA)
<b>Candelaria</b>	Gas 4-CC3	68,7	93,75
	Gas 5-CC3	68,7	93,75
	Vapor 7-CC3	68,7	93,75
	Vapor 5	37,28	50
	Vapor 7	37,28	50
<b>Granadilla</b>	Gas 2	39,2	52,5
	Gas 5-CC2	77,5	98
	Gas 6- CC2	77,5	98
	Vapor 4-CC2	78,7	98,38
	Vapor 1	74,24	100
	Vapor 2	74,24	100
	Gas 3-CC1	68,7	93,75
	Gas 4-CC1	68,7	93,75
	Vapor 3-CC1	68,7	93,75
	Gas 1	32,34	46,88
	Diésel 1	20,51	30
	Diésel 2	20,51	30
	<b>Cotesa</b>	Gas 1	36
<b>Total</b>		1017,5	1363,76

Tabla 26. Parque de generación convencional previsto horizonte 2020 isla de Tenerife. Fuente: elaboración propia a partir de [1].

La **inercia total (H)** esperada en 2020 proporcionada por la generación térmica de las centrales eléctricas de Candelaria y Granadilla estará en torno a **60,5s** [1].

---

*Parque de Generación Renovable isla de Tenerife Horizonte 2020.*

---

<b>Tipo Renovable</b>	<b>Denominación</b>	<b>Potencia activa (MW)</b>
<b>Eólica</b>	Punta Teno	1,8
	P E 18	4,6
	P E 11	13,8
	P E 12	11,5
	P E 13	13,8
	P E 14	13,8
	Llanos esquina	5,95
	Finca Mogán	26
	P E 9	13,8
	P E 10	11,5
	Porís Abona 2	19,6
	La Morra	6,3
	P E 1	11,5
	P E 2	13,8
	C Granadilla	16,1
	Aulagas	13,8
	El Rincón	18,4
	C M Arico	18,4
	Chimiche	18,4
	Punta Gomeros	5,4
	P E 3	9,2
	P E 4	11,5
	P E 5	11,5
	P E 6	13,8
	P E 7	13,8
	P E 8	7,2
	Porís Abona	18,4
	Arete	18,4
	La Roca	18,4
	ITER 1	2,3
ITER 2	11,5	
ITER 3	8	
<b>Total Eólica</b>		<b>402,25</b>
<b>Fotovoltaica</b>	Pol Guimar	3,07



	El Rosario	5,45
	Cruz chica	4,98
	Tacoronte	0,72
	Guía Isora	18,75
	Chayofa	10,65
	Arona	9,42
	Arico	108,41
	Tagoro	12,86
	Abona	9,06
	Pol Granadilla	13,30
	ITER	21,83
<b>Total Fotovoltaica</b>		<b>218,5</b>
<b>Total Renewable</b>		<b>620,75</b>

Tabla 27. Parque de generación renovable previsto horizonte 2020 isla de Tenerife. Fuente: elaboración propia a partir de [131].

Diagrama Unifilar del sistema eléctrico isla de Tenerife

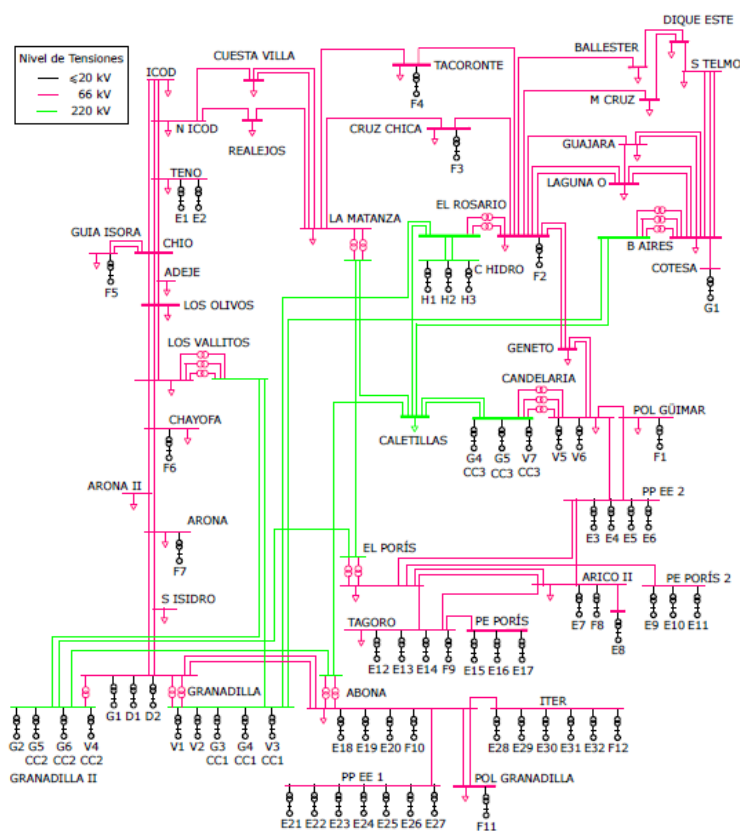


Figura 110. Diagrama unifilar sistema eléctrico isla de Tenerife. Fuente: [131].

## Aspectos teóricos herramientas análisis estadístico.

### Análisis Multivariante.

Se define como análisis multivariante al conjunto de métodos estadísticos cuya finalidad es analizar simultáneamente grupos de datos multivariantes. Existen varias variables medidas para cada individuo u objeto de estudio.

Los objetivos que persigue el análisis multivariante son:

- Proporcionar métodos cuya finalidad es el estudio conjunto de datos multivariantes que, mediante el análisis estadístico uni y bivalente no es posible lograr.
- Ayudar al investigador a tomar decisiones en el contexto en el que se encuentre teniendo en cuenta la información que aporta el conjunto de datos analizado.

Las técnicas multivariantes se clasifican en:

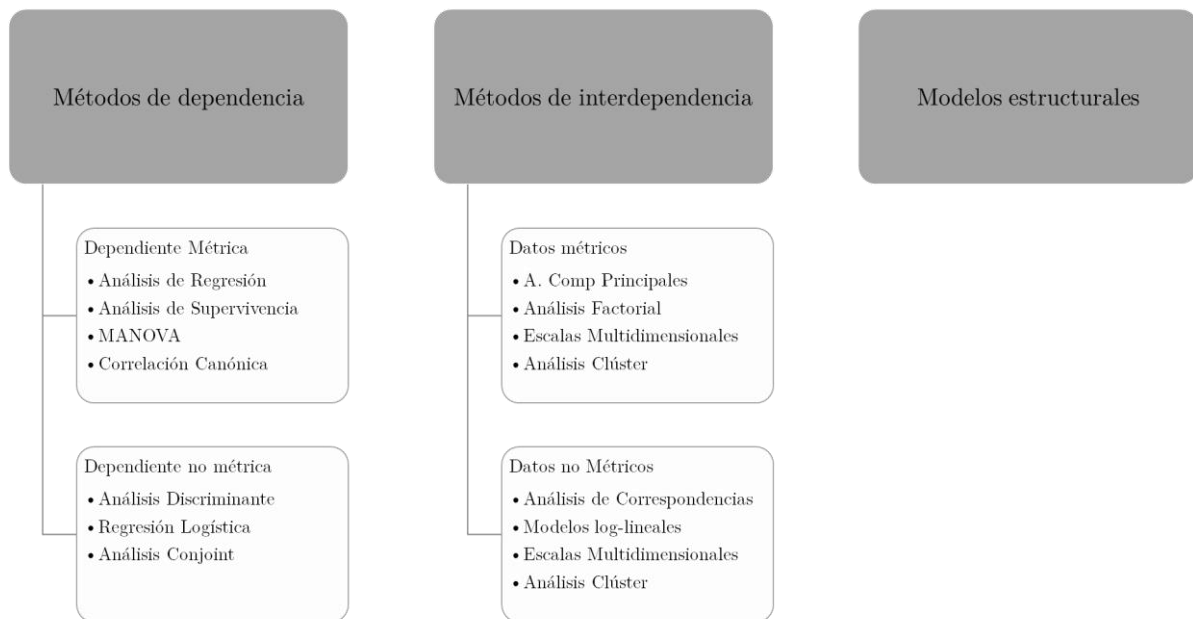


Figura 111. Clasificación de las técnicas del análisis multivariante.

### Estadísticos de resumen.

Los estadísticos de resumen calculan el número de diversos estadísticos que se usan comúnmente para resumir una muestra de  $n$  observaciones.

La mayoría de los estadísticos se encuentran dentro de una de estas tres categorías:

- Medidas de tendencia central. Estadísticos que caracterizan el “centro” de los datos.
- Medidas de dispersión. Estadísticos que caracterizan la dispersión de los datos.
- Medidas de forma. Estadísticos que caracterizan la forma de los datos en relación con una distribución normal.

En el presente estudio se van a tener en cuenta los siguientes estadísticos de resumen para la nube de datos: media, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo, rango, sesgo y curtosis estandarizados.

### Matriz de Dispersiones.

La Matriz de Dispersiones crea una matriz de dispersiones variadas para todos los pares de variables.

La dispersión en la fila  $i$ , columna  $j$  despliega la variable  $i$  en el eje vertical y la variable  $j$  en el eje horizontal. En la matriz, cualquier par de variables es graficado dos veces, una con la primera variable sobre el eje X y una con esa variable sobre el eje Y. La matriz puede usarse frecuentemente para identificar aquellas variables que están altamente correlacionadas, así como puntos lejanos ocasionales.

### Correlaciones.

Los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos columnas en una escala de  $-1$  a  $+1$ . Entre mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables.

Para cada par de variables se va a establecer:

- $r_{ij}$ , el coeficiente de correlación de momento del producto Pearson estimado entre la variable fila  $i$  y la variable columna  $j$ .
- $P_{ij}$ , un P-valor que puede ser usado para probar la hipótesis de que la correlación entre dos variables es igual a 0.  
P-Valores pequeños (menores que 0,05 si se opera a un nivel de significancia del 5%) corresponden a correlaciones estadísticamente significativas.

Si se sospecha la presencia de *Aberrantes*, entonces la correlación entre cada par de variables puede calcularse usando un coeficiente de **correlación por rangos** en lugar de una correlación producto – momento. Como la correlaciones por rango de Spearman y las correlaciones por rango de Kendall. Se definen a continuación:

- Correlaciones por rango de Spearman. Estas correlaciones se calculan primero reemplazando los datos de cada variable por sus rangos (en escala del 1 al  $n$ ) y luego calculando el grado de desacuerdo entre los rangos.
- Correlaciones por rango de Kendall. Estas correlaciones se basan en el número de pares de observaciones concordantes y discordantes, donde un par concordante es

aquel en el que las variables de la primera fila o son ambas mayores que las variables de la segunda fila o son ambas más pequeñas

Como herramienta de resumen y visual del estudio de las correlaciones los resultados obtenidos se representan en un **gráfico de correlaciones**.

### **Covarianzas.**

Las covarianzas proveen una medida de la extensión en la que dos variables varían juntas en función de la *Ecuación 30*.

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}$$

*Ecuación 30. Covarianza.*

La finalidad de la realización del análisis multivariante a los resultados obtenidos del estudio de estabilidad de la frecuencia de red es la de establecer si existe o no relación entre la existencia de eventos fuera del estado normal de operación del sistema eléctrico y las variables establecidas para definir el parque de generación undimotriz y el estado de operación de la red eléctrica.

### **Regresión lineal.**

El procedimiento de regresión lineal se va a llevar a cabo en el presente estudio tanto para el análisis de la nube de casos como para el análisis del caso particular. A continuación, se resumen los aspectos más importantes a tener en cuenta de ambos procedimientos.

### **Regresión Simple.**

El procedimiento de regresión simple está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor cuantitativo X sobre una variable dependiente Y. Tanto si los modelos son lineales como no lineales pueden ser ajustados usando mínimos cuadrados o el procedimiento de estimación resistente. Las pruebas realizadas determinan la significancia estadística del modelo.

Los resultados que se obtienen del modelo ajustado son:

- **Variables y modelo:** identificación de las variables de captura y el modelo que fue ajustado. Se suele utilizar un modelo lineal.

$$Y = a + b X$$

*Ecuación 31. Ecuación ajuste regresión simple.*

- **Coefficientes:** muestra los coeficientes estimados, errores estándares, t-estadísticas y P- valores. Los estimadores de los coeficientes del modelo se usan para describir la ecuación ajustada del modelo.  
La t-estadística prueba la hipótesis nula de que el correspondiente parámetro del modelo es igual a 0, versus la hipótesis alternativa de que no es igual a 0. Pequeños P-valores (menores que 0.05 si se opera con un nivel de significancia) indican que el coeficiente del modelo es significativamente diferente a 0.
- **Análisis de la varianza (ANOVA):** descomposición de la variabilidad de la variable dependiente Y dentro de un modelo de suma de cuadrados y de suma de cuadrados del error o residuos. Es de particular interés en este análisis la Prueba F y su P-valor asociado para probar la significancia estadística del modelo ajustado. Un pequeño P-valor (menor a 0.05 si se opera con un nivel de significancia de 5%) indica qué relación estadística de la forma especificada entre X e Y.
- **Estadísticos:**
  - *Coefficiente de correlación.* Mide el grado de asociación lineal entre Y - X en un rango que va de -1 (perfecta correlación lineal negativa) a +1 (perfecta correlación lineal positiva).
  - *R-squared.* Representa el porcentaje de la variabilidad en Y que ha sido explicado por el modelo de regresión ajustado en un rango que va de 0 a 100%.
  - *R-Squared Ajustada.* Muestra el estadístico R cuadrado, ajustado por el número de coeficientes en el modelo. Este valor es usado para comparar modelos con diferente número de coeficientes.
  - *Error Absoluto Medio.* Muestra el valor absoluto promedio de los residuos.
  - *Estadístico Durbin-Watson.* Es una medida de la correlación serial de los residuos. Si los residuos varían aleatoriamente toma un valor cercano a 2. Un valor pequeño de P-valor indicaría una tendencia no aleatoria en los residuos.

La **gráfica** del modelo ajustado muestra la línea de mejor ajuste o ecuación de predicción, los intervalos de confianza y límites de predicción.

- La línea del mejor ajuste o ecuación de predicción debería ser usada para predecir valores de variable dependiente Y dado los valores de la variable independiente X.
- Los intervalos de confianza para la respuesta media de X describen que tan adecuadamente ha sido estimada la ubicación de la línea dada la muestra de datos disponible. Conforme mayor sea el tamaño de la muestra n mejor se ajustarán estos intervalos.
- Límites de predicción para nuevas observaciones. Sin importar el tamaño de la muestra, las observaciones nuevas variarán alrededor de la línea verdadera con una desviación estándar igual a  $\sigma$ .

- **Residuos atípicos.** Una vez a ha sido ajustado el modelo es útil estudiar los residuos. Los residuos que estén estudentizados (utilizado para detectar valores atípicos) con valores mayores a 3 en valor absoluto corresponden a puntos mayores a tres desviaciones estándar del modelo ajustado, evento que suele ocurrir en el caso de las distribuciones normales.
- **Puntos influyentes.** Al ajustar un modelo de regresión no todas las observaciones tienen la misma influencia sobre el parámetro estimado en el modelo ajustado. En una regresión simple los puntos localizados en niveles muy bajos o altos de  $X$  tienen una influencia más grande que aquellos localizados más cerca de la media de  $X$ .

---

*Anexo Capítulo 7*

*Mecanismo de alisado de potencia: sistemas de almacenamiento energético para contribuir a la estabilidad de la frecuencia*

---

**Table ES.2.** Summary of compiled 2018 findings and 2025 predictions for cost and parameter ranges by technology type – non-BESS.

Parameter	Pumped Storage Hydropower <sup>(a)</sup>	Combustion Turbine	CAES <sup>(a)</sup>	Flywheel <sup>(b)</sup>	Ultracapacitor <sup>(c)</sup>
Capital Cost – Energy Capacity (\$/kW)	1,700-3,200 <b>2,638</b>	678-1,193 <b>940</b>	1,050-2,544 <b>1,669</b>	600-2,400 <b>2,400</b>	240-400 <b>400</b>
Power Conversion System (PCS) (\$/kW)	Included in Capital Cost	N/A	N/A	Included in Capital Cost	350 (211)
Balance of Plant (BOP) (\$/kW)					100 (95)
Construction and Commissioning (\$/kW)				480 <sup>(d)</sup>	80 <sup>(d)</sup>
Total Project Cost (\$/kW)	1,700-3,200 <b>2,638 <sup>(f)</sup></b>	678-1,193 <b>940</b>	1,050-2,544 <b>1,669</b>	1,080-2,880 <b>2,880</b>	<b>930 (835)</b>
Total Project Cost (\$/kWh)	106-200 <b>165</b>		94-229 <b>105</b>	4,320-11,520 <b>11,520</b>	<b>74,480 (66,640)</b>
O&M Fixed (\$/kW-year)	15.9	13.0	16.7	5.6	1
O&M Variable (cents/kWh)	0.00025	1.05	0.21	0.03	0.03
System Round-Trip Efficiency (RTE)	0.80	0.328	0.52	0.86	0.92
Annual RTE Degradation Factor				0.14%	0.14%
Response Time	FS AS Ternary	From cold start: 10 min Spin ramp rate: 8.33%/min Quick start ramp rate: 22.2%/min	3-10 min	0.25 sec	0.016 sec
	Spinning-in-air to full-load generation	5-70 s 60 s 20-40 s			
	Shutdown to full generation	75-120 s 90 s 65-90 s			
	Spinning-in-air to full load	50-80 s 70 s 25-30 s			
	Shutdown to full load	160-360 s 230 s 80-85 s			
	Full load to full generation	90-220 s 280 s 25-60 s			
	Full generation to full load	240-500 s 470 s 25-45 s <sup>(e)</sup>			
Cycles at 80% Depth of Discharge	15,000	Not Relevant	10,000	200,000	1 million
Life (Years)	>25	20	25	>20	16
MRL	9 (10)	10	8 (9)	8 (9)	9
TRL	8 (9)	9	7 (8)	7(8)	8
a) E/P = 16 h		(d) 20 percent of capital cost			
b) E/P = 0.25 h		AS = adjustable speed; FS = fixed speed.			
c) E/P = 0.0125 h					

Tabla 28. Tabla costes sistemas de almacenamiento energético. Fuente: Energy Storage Technology and Cost Characterization Report.





**ULPGC**  
**Universidad de**  
**Las Palmas de**  
**Gran Canaria**